

CARACTERIZACIÓN POR MEDIO DE MICROSCOPIA OPTICA Y ELECTRONICA DE  
BARRIDO A RECUBRIMIENTOS TERMOASPERSADOS POR LA TECNICA DE ARCO  
ELECTRICO DEPOSITADOS SOBRE SUSTRATOS DE ACERO AISI SAE 4340

CÉSAR ANDRÉS MOLINA GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
BOGOTA  
2014

CARACTERIZACIÓN POR MEDIO DE MICROSCOPIA OPTICA Y ELECTRÓNICA DE  
BARRIDO A RECUBRIMIENTOS TERMOASPERADOS POR LA TECNICA DE ARCO  
ELECTRICO DEPOSITADOS SOBRE SUSTRATOS DE ACERO AISI SAE 4340

CÉSAR ANDRÉS MOLINA GONZÁLEZ

TRABAJO DE GRADO

MSC. HECTOR FERNANDO ROJAS MOLANO  
INGENIERO METALURGICO

UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
BOGOTA  
2014

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá 17, Febrero, 2014

Dedico este logro personal a:

A DIOS: Que me brindo la perseverancia y sabiduría en este camino

A MIS PADRES: Domingo Molina Fonseca y Ana Julia González Torres que con sus oraciones sacrificios y paciencia no me dejaron desfallecer hasta lograr mi meta.

A MI HERMANA: Andrea Molina González.

Finalmente a Anyela Gómez Garzón por su gran apoyo y compañía incondicional en la fase final del proyecto.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus agradecimientos a:

A las directivas de la Universidad Libre, por su total colaboración para el desarrollo de este proyecto.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica, por el acompañamiento y soporte para la realización del proyecto

Al MSC HECTOR FERNANDO ROJAS MOLANO, por su asesoría, dirección y persistencia para el desarrollo y culminación del proyecto CARACTERIZACIÓN POR MEDIO DE MICROSCOPIA OPTICA Y ELECTRONICA DE BARRIDO A RECUBRIMIENTOS TERMOASPERSADOS POR LA TECNICA DE ARCO ELECTRICO DEPOSITADOS SOBRE SUSTRATOS DE ACERO AISI SAE 4340

A las profesoras Edna Corredor y Pilar Delgado, por su asesoría, colaboración y consejo durante la realización de cada una de las fases del proyecto.

A Tecnoacademia SENA y a la encargada del laboratorio de nanotecnología la Ing. July Alexandra Rincón, por estar presta a colaborar en la elaboración de las pruebas.

## **TABLA DE CONTENIDO**

<b>TÍTULO.....</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>14</b>
<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>15</b>
<b>DESCRIPCION DEL PROBLEMA.....</b>	<b>17</b>
<b>JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>18</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
<b>1. DISEÑO METODOLÓGICO.....</b>	<b>21</b>
1.1. Revisión Bibliográfica .....	21
1.2. Materiales y preparación de las probetas.....	21
1.3. Selección de alambres y aspersion térmica.....	22
1.4. Diseño experimental.....	22
1.5. Selección y combinación de parámetros.....	23
1.6. Preparación para las pruebas pertinentes.....	24
1.7. Análisis Metalográfico.....	25
1.8. Microdureza.....	25
1.9. Microscopia Electrónica de barrido.....	26
1.10. Microscopia de Fuerza Atómica.....	26
1.11. Fluorescencia de rayos X .....	26
1.12. Análisis de resultados y conclusiones.....	26
<b>2.MARCO TEORICO.....</b>	<b>27</b>

<b>2.1.</b>	<b>ASPERSION TERMICA:</b>	<b>27</b>
2.1.1.	Aspersión Por llama.	27
2.1.2.	Aspersión por Plasma	28
2.1.3.	Aspersión de Alta velocidad (HVOF).	28
2.1.4.	Aspersión por arco eléctrico (AS).	29
<b>2.2.</b>	<b>Equipo.</b>	<b>34</b>
<b>2.3.</b>	<b>Materiales.</b>	<b>35</b>
2.3.1.	Acero AISI/SAE 4340.	35
2.3.2.	Material 530 AS.	35
2.3.3.	Material 560 AS.	36
2.3.4.	Material 140MXC.	37
<b>2.4.</b>	<b>MICROSCOPIA OPTICA</b>	<b>38</b>
<b>2.5.</b>	<b>MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.</b>	<b>39</b>
2.5.1.	Fuente de Energía	40
2.5.2.	Porta muestras.	40
<b>2.6.</b>	<b>MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA (AFM)</b>	<b>41</b>
2.6.1.	Técnicas.	41
2.6.2.	Principios básicos de trabajo	41
<b>2.7.</b>	<b>MICRODUREZA</b>	<b>42</b>
<b>2.8.</b>	<b>Fluorescencia de Rayos X (FRX)</b>	<b>43</b>
<b>3.</b>	<b>MARCO NORMATIVO</b>	<b>45</b>
<b>4.</b>	<b>MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>46</b>
<b>5.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS.</b>	<b>47</b>
<b>5.1.</b>	<b>Análisis Metalográfico de los recubrimientos.</b>	<b>47</b>
5.1.1.	140MXC-530AS.	47
5.1.2.	140MXC-560AS	52
<b>5.2.</b>	<b>Microdureza</b>	<b>57</b>
<b>5.3.</b>	<b>Caracterización de partículas semifundidas.</b>	<b>59</b>
<b>5.4.</b>	<b>Microscopia Electrónica de Barrido.</b>	<b>63</b>
5.4.1.	140MXC – 530AS	63

5.4.2.	140MXC – 560AS.....	68
5.5.	Análisis químico por Fluorescencia de rayos X (FRX).....	72
5.5.1.	140MXC – 530AS.....	72
5.5.2.	140MXC -560AS.....	74
5.5.3.	Sustrato.....	76
5.6.	Análisis por microscopia de fuerza atómica (AFM). ....	76
5.6.1.	140MXC - 530AS.....	76
5.6.2.	140MXC – 560AS.....	84
6.	CONCLUSIONES. ....	92
7.	RECOMENDACIONES. ....	93
8.	BIBLIOGRAFÍA. ....	94



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DEL DISEÑO DE CORTE DE PROBETAS .....	21
FIGURA 2. ESQUEMA ASPERSIÓN POR LLAMA. ....	27
FIGURA 3. ESQUEMA ASPERSIÓN POR PLASMA. ....	28
FIGURA 4. ESQUEMA ASPERSIÓN DE ALTA VELOCIDAD (HVOF). ....	29
FIGURA 5. ESQUEMA DE ASPERSIÓN POR ARCO ELÉCTRICO. ....	29
FIGURA 6. EQUIPO DE TERMOASPERSIÓN POR ARCO ELÉCTRICO. ....	30
FIGURA 7. PARAMETROS Y VARIABLES TÍPICAS DEL PROCESO DE TERMO ASPERSIÓN. ....	31
FIGURA 8. FALLAS COMUNES EN RECUBRIMIENTOS TERMO ASPERSADOS. ....	32
FIGURA 9. ESTRUCTURA LAMINAR TÍPICA DEL PROCESO DE TERMO ASPERSIÓN. ....	32
FIGURA 10. DEFECTOS TÍPICOS EN TERMOASPERSIÓN. ....	33
FIGURA 11. EQUIPO DE ASPERSIÓN TÉRMICA SYSTEM EUTECTIC 4. ....	34
FIGURA 12. MICROSCOPIO METALOGRAFÍCO UNIVERSIDAD LIBRE. ....	38
FIGURA 13. ESTRUCTURA MICROSCOPIO ÓPTICO CONVENCIONAL. ....	39
FIGURA 14. EQUIPO DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO TECNO ACADEMIA SENA. ....	40
FIGURA 15. ESQUEMA MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO. ....	40
FIGURA 16. ESQUEMA BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DEL AFM. ....	41
FIGURA 17. MICRO DURÓMETRO UNIVERSIDAD LIBRE. ....	42
FIGURA 18. INDENTADOR PIRAMIDAL VICKERS. ....	42
FIGURA 19. ENSAYO VICKERS. ....	43
FIGURA 20. ESQUEMA DE LA EMISIÓN DE LA RADIACIÓN DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X. ....	44
FIGURA 21. EQUIPO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X. ....	44
FIGURA 22. MUESTRA M1 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	47
FIGURA 23. MUESTRA M2 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	48
FIGURA 24. MUESTRA M3 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	48
FIGURA 25. MUESTRA M4 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	49
FIGURA 26. MUESTRA M5 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	49
FIGURA 27. MUESTRA M6 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	49
FIGURA 28. MUESTRA M7 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	50
FIGURA 29. MUESTRA M8 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	50

FIGURA 30. MUESTRA M9 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	51
FIGURA 31. MUESTRA M1 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	52
FIGURA 32. MUESTRA M2 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	52
FIGURA 33. MUESTRA M3 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	53
FIGURA 34. MUESTRA M4 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	53
FIGURA 35. MUESTRA M5 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	54
FIGURA 36. MUESTRA M6 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	54
FIGURA 37. MUESTRA M7 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	54
FIGURA 38. MUESTRA M8 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	55
FIGURA 39. MUESTRA M9 METALOGRAFÍA. (A). COMPORTAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO. (B).CONDICIONES DE ESPESOR. ....	55
FIGURA 40.HUELLA MICRODUREZA. FUENTE: AUTOR. ....	57
FIGURA 41. DIVISIÓN DE LA MUESTRA. FUENTE: AUTOR DEL PROYECTO.....	59
FIGURA 42.PERFILES DE MEDIDA DE PARTÍCULAS SEMIFUNDIDAS. FUENTES: AUTOR DEL PROYECTO .....	60
FIGURA 43.PERFILES DE MEDIDA DE PARTÍCULAS SEMIFUNDIDAS. FUENTES: AUTOR DEL PROYECTO .....	60
FIGURA 44: MICROGRAFÍA SEM M1. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE. ....	63
FIGURA 45: MICROGRAFÍA SEM M2. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	64
FIGURA 46: MICROGRAFÍA SEM M3. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	64
FIGURA 47: MICROGRAFÍA SEM M4. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	65
FIGURA 48: MICROGRAFÍA SEM M5. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	65
FIGURA 49: MICROGRAFÍA SEM M6. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	66
FIGURA 50: MICROGRAFÍA SEM M7. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	66
FIGURA 51: MICROGRAFÍA SEM M8. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	67
FIGURA 52: MICROGRAFÍA SEM M9. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	67
FIGURA 53: MICROGRAFÍA SEM M1. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	68
FIGURA 54: MICROGRAFÍA SEM M2. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	68
FIGURA 55: MICROGRAFÍA SEM M3. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	69
FIGURA 56: MICROGRAFÍA SEM M4. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	69
FIGURA 57: MICROGRAFÍA SEM M5. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	70
FIGURA 58: MICROGRAFÍA SEM M6. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	70

FIGURA 59: MICROGRAFÍA SEM M7. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	71
FIGURA 60: MICROGRAFÍA SEM M8. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	71
FIGURA 61: MICROGRAFÍA SEM M9. (A) VISTA GENERAL, (B) DETALLE .....	72
FIGURA 62. ESPECTRO COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL RECUBRIMIENTO EN M1.....	73
FIGURA 63. ESPECTRO COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL RECUBRIMIENTO EN M9.....	74
FIGURA 64. ESPECTRO COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL RECUBRIMIENTO EN M1.....	75
FIGURA 65. ESPECTRO COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL RECUBRIMIENTO EN M8.....	75
FIGURA 66. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M1. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	77
FIGURA 67. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M2. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	78
FIGURA 68. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M3. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	78
FIGURA 69. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M4. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	79
FIGURA 70. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M5. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	80
FIGURA 71. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M6. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	81
FIGURA 72. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M7. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	82
FIGURA 73. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M8. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	83
FIGURA 74. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M9. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	83
FIGURA 75. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M1. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	84
FIGURA 76. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M2. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	85
FIGURA 77. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M3. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	86
FIGURA 78. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M4. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	87
FIGURA 79. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M5. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	88
FIGURA 80. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M6. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	88
FIGURA 81. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M7. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	89
FIGURA 82. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M8. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	90
FIGURA 83. COMPORTAMIENTO SUPERFICIAL MUESTRA M9. (A IMAGEN TOPOGRÁFICA, (B DIMENSIÓN FRACTAL, .....	91

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. DISEÑO EXPERIMENTAL ARREGLO ORTOGONAL $L_9(3^{4-2})$ .....	23
TABLA 2. PARÁMETRO DE ASPERSIÓN PARA LA COMBINACIÓN 140MXC-560AS.....	24
TABLA 3. PARÁMETRO DE ASPERSIÓN PARA LA COMBINACIÓN 140MXC-530AS.....	24
TABLA 4: CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE ASPERSIÓN TÉRMICA POR ARCO.....	31
TABLA 5 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE DEPOSICIÓN POR ARCO ELÉCTRICO.....	35
TABLA 6. COMPOSICIÓN QUÍMICA ACERO AISI/SAE 4340.....	35
TABLA 7. PARÁMETROS DE ASPERSIÓN RECOMENDADOS.....	36
TABLA 8. PROPIEDADES DEL ALAMBRE.....	36
TABLA 9. PARÁMETROS DE ASPERSIÓN RECOMENDADOS.....	37
TABLA 10. PROPIEDADES DEL ALAMBRE.....	37
TABLA 11. PARÁMETROS DE ASPERSIÓN RECOMENDADOS.....	38
TABLA 12. PROPIEDADES DEL ALAMBRE.....	38
TABLA 13. VALOR DE ESPESORES DE LOS DEPÓSITOS.....	51
TABLA 14. VALOR DE ESPESORES DE LOS DEPÓSITOS.....	56
TABLA 15. ENSAYO DE MICRODUREZA CON CARGA DE 300G.....	58
TABLA 16. TAMAÑO PROMEDIO DE PARTÍCULA RECUBRIMIENTO 140MXC - 530AS.....	61
TABLA 17. TAMAÑO PROMEDIO DE PARTÍCULA RECUBRIMIENTO 140MXC - 560AS.....	62
TABLA 18: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MUESTRA M1.....	73
TABLA 19: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MUESTRA M9.....	73
TABLA 20: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MUESTRA M1.....	74
TABLA 21: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL SUSTRATO.....	76

## **TÍTULO.**

CARACTERIZACIÓN POR MEDIO DE MICROSCOPIA OPTICA Y ELECTRONICA DE  
BARRIDO A RECUBRIMIENTOS TERMOASPERSADOS POR LA TECNICA DE ARCO  
ELECTRICO DEPOSITADOS SOBRE SUSTRATOS DE ACERO AISI SAE 4340

## INTRODUCCION

La Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial de Colombia “COTECMAR”, presta sus servicios de mantenimiento y reparación a todas las unidades de combate fluvial y oceánicas pertenecientes a la Armada Nacional de Colombia, que debido a las agresivas condiciones del medio en el que se encuentran operando estas embarcaciones, muchas de sus partes constitutivas presentan un alto índice de deterioro con relación a los fenómenos de desgaste y corrosión , lo que implica la recuperación de dichas partes, haciendo uso de procesos no convencionales en Colombia como lo es la proyección térmica, en especial la técnica por medio de arco eléctrico.

En esta investigación se produjeron recubrimientos disímiles a base de hierro con las características de los materiales nanoestructurados (140MXC) y combinarlos con materiales convencionales como aceros al carbono (530AS) e inoxidables (560AS) mediante un equipo de proyección térmica por arco. Para ello se empleó un diseño de experimentos de matriz ortogonal  $L_9$  (método Taguchi), trabajando con parámetros de proyección tales como presión de aire (primario y secundario) y corriente y utilizando como sustrato un acero AISI SAE 4340. Las condiciones de proyección utilizadas se basaron inicialmente en las recomendaciones de los fabricantes y posteriormente según los parámetros de funcionalidad y operatividad del equipo en el astillero de COTECMAR.

Se realizó un estudio microestructural que implica la morfología, espesores de capa, rugosidad, defectología, esfuerzos residuales y un análisis de splats, por medio de microscopia óptica convencional, microscopia de fuerza atómica, de microscopia electrónica de barrido y fluorescencia rayos x. Los resultados se estimaron en función de la defectología del recubrimiento y de los parámetros del equipo

## ANTECEDENTES.

Con el creciente interés por parte de la industria colombiana en mejorar las cualidades y propiedades de piezas, montajes y mecanismos ha promovido la realización de diferentes estudios enfocados en el uso de materiales de alto desempeño como aporte a estas mejoras; tal es el caso de los recubrimientos, que no solo brindan acabados superficiales de buena calidad si no que incrementa la resistencia de la pieza al desgaste.

En nuestro país, técnicas como la electrólisis como medio de protección es muy conocida y usada no solo por los beneficios que brinda sino por su bajo costo, se ha convertido en la mejor opción dejando de lado otra técnica como la aspersion térmica que aunque no es novedosa empieza a tomar fuerza en la industria nacional.

La aspersion térmica es una de las técnicas más eficaces en la protección de superficies, internacionalmente se hace uso de esta técnica no solo como protección de las superficies sino también para la recuperación de las mismas que se han desgastado por el uso y por el ambiente al que se encuentran expuestos <sup>[1]</sup>.

En Latinoamérica se llevan a cabo estudios sobre todos los beneficios que brinda, en la Universidad de San Carlos de Guatemala estudian el uso de termo aspersion en frio como medio de mantenimiento tanto preventivo como correctivo <sup>[2]</sup>

Actualmente la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) en conjunto con el gobierno nacional ha realizado una serie de estudios de tipo experimental para comprobar los beneficios que otorga la termo aspersion a la resistencia al desgaste <sup>[3]</sup> y la corrosión si no también casos específicos como la influencia de la rugosidad en la micro dureza y en la resistencia al desgaste <sup>[4]</sup> así como otras características benéficas de la técnica, no solo en aceros convencionales sino también en aceros inoxidables presentando una alta resistencia a la cavitación de sobretodo en aquellos recubiertos por nanocomposito de matriz polimérica y un mejoramiento a la resistencia a la erosión en los aspersados con nanocomposito cerámico, dejando ver que los principales mecanismos de desgaste realizados en las pruebas fueron el micro-corte y la deformación plástica en los dos recubrimientos <sup>[5]</sup>.

La industria naval también ha formado parte de una serie de investigaciones alrededor de la resistencia la corrosión en ambientes salinos y de cómo la aspersion térmica evita el ataque de este ambiente extremo a las estructuras comprometiendo la durabilidad de las misma, por otra parte comprobaron la ineficiencia de la aspersion en monocapa de recubrimientos de aleación de Níquel-cromo ya que brindan una protección a la corrosión pero en lapso de ataque corrosivo inferiores a 7 horas y temperaturas por debajo de 600°C, dejando claro la proporcionalidad entre temperatura y velocidad de corrosión. <sup>[6]</sup>

En esta área donde más se ve evidenciadas las propiedades de estas técnicas no solo para la protección de los dispositivos sino también para la recuperación de los mismos y la reducción de costos ya que las piezas que son más vulnerables al ataque corrosivo y por desgaste no se fabrican en serie y el remplazo de estas significa para la empresa naval tiempo perdido para la puesta en marcha debido a los tiempos muertos. Un estudio elaborado por la Universidad Nacional demostró como en piezas de gran tamaño y en su mayoría elaboradas en aleaciones de bronce eran las candidatas perfectas para cierto tipo de recubrimientos termo aspersados para su recuperación ya que esta técnica no varía sus dimensiones ni tampoco genera tensiones residuales debido a los choques térmicos a los cuales son sometidos <sup>[7]</sup>, así como la comprobación de la reducción en la velocidad de corrosión sobre el metal recubierto con monocapa de acero inoxidable frente un ataque constante de sales fundidas con temperaturas por debajo de los 500°C, ya que a partir de esta se inicia el proceso de desprendimiento del recubrimiento por lo cual es necesario la combinación del mismo con otros recubrimientos para mejorar los resultados. <sup>[8]</sup>

En el caso de sustratos de acero al carbono se han realizado estudios en la universidad de Antioquia de resistencia al desgaste a recubrimientos aspersados de WC y Ni – W- Co por el proceso a la llama, efectuando la caracterización de estos por absorción atómica y su respectivo análisis morfológico tanto del recubrimiento como del material base por medio de la técnica de microscopia electrónica de barrido, mostrando partículas aun sin fundir que afecta directamente su comportamiento frente al desgaste. <sup>[9]</sup>



## **DESCRIPCION DEL PROBLEMA.**

La necesidad actual de las industrias es buscar soluciones para el aumento de la vida útil de los diferentes componentes que conforman un sistema. Unos de estos mecanismos es la protección superficial de los mismos por medio de las técnicas y/o procesos de termo aspersión. Estos mejoran las condiciones de los materiales contra la corrosión, erosión y desgaste. Entidades como la Universidad Tecnológica de Pereira, al Universidad Nacional y COTECMAR han realizados estudios que hacen referencia al mejoramiento de estas condiciones mediante el uso de estas técnicas logrando resultados favorables según las condiciones de funcionalidad y operatividad de los componentes.

Para lograr esto se deben conocer las propiedades y características no solo de los materiales de depósito si no de la superficie que se va a recubrir, ya que el éxito del proceso depende de las variables tales como el perfil de anclaje que se puede obtener por medios abrasivos, la presión de aire con la que se proyecta el depósito en el caso específico de la técnica de arco eléctrico y de la temperatura de fusión del material de depósito en caso de que se presente.

De esta manera se puede evitar inclusiones en el recubrimiento que se generan por estas condiciones de aplicación y más cuando se trata de la exposición a ambientes industriales y marinos por la acumulación de sales en el caso ultimo, también la influencia de la humedad relativa del sitio de trabajo que pueden llegar a afectar las piezas o componentes con la aparición de los diferentes mecanismos de corrosión la cual es una de las causas más comunes para la degradación de los materiales metálicos.

## **JUSTIFICACIÓN.**

Los procesos de termo aspersión no son muy conocidos a nivel general en Colombia, sino solo por empresas especializadas que manejan esos procesos en nuestro país. El uso de las técnicas de caracterización morfológica como microscopia óptica convencional y microscopia electrónica de barrido permiten conocer las condiciones de las superficies aspersadas y determinar las cualidades de estos recubrimientos e incluso las ventajas y desventajas entre los diferentes procesos o técnicas si se tratase de una comparación entre ellos. La técnica de microscopia óptica convencional da la posibilidad de medir el espesor de los depósitos mediante el uso del analizador de imágenes que trae incorporado el software de microscopio metalográfico; mientras que la microscopia electrónica de barrido debido a su mayor resolución permite conocer más en detalle características específicas del recubrimiento en su condición morfológica dependiendo del perfil de anclaje que se le haya dado al sustrato.

Así mismo combinando las dos técnicas se puede llegar a determinar las condiciones óptimas del proceso y en el caso particular de la técnica por arco eléctrico estimar los parámetros más adecuados del equipo, según las características de los alambres suministrada por los fabricantes de los mismos; de esta manera se puede establecer este método de caracterización como una herramienta de apoyo a las empresas del sector industrial que usan estas técnicas ayudándoles a mejorar la calidad de sus productos y procesos.

## **OBJETIVOS.**

### **General**

Caracterizar por medio de microscopia óptica convencional y electrónica de barrido a recubrimientos termoaspersados por el proceso de arco eléctrico depositados sobre sustratos de acero AISI SAE 4340

### **Específicos**

- Determinar las características físico-químicas y mecánicas de los recubrimientos depositados sobre el sustrato AISI SAE 4340
- Estimar los parámetros del equipo de aspersión térmica para los recubrimientos a ser depositados por la técnica de arco eléctrico.
- Valorar los espesores de los recubrimientos depositados por medio de la técnica de microscopia óptica convencional según los parámetros de depósito.
- Evaluar la morfología de los recubrimientos depositados por medio del ensayo de microscopia electrónica de barrido según su preparación superficial.

### **DELIMITACIÓN DEL PROYECTO.**

El presente estudio abarcara la caracterización de los recubrimientos termoaspersados por medio del proceso de arco eléctrico a través de las técnicas de microscopia óptica convencional y microscopia electrónica de barrido en función de los parámetros de depósito.

Se presentará un documento donde se encontrara la caracterización realizada por medio de microscopia óptica (MOC) y electrónica de barrido (MEB) de superficies termoaspersadas por la técnica de arco eléctrico sobre sustratos de acero AISI SAE 4340.

## 1. DISEÑO METODOLÓGICO.

Para el funcionamiento óptimo de piezas y mecanismos recubiertos por la técnica de termoaspersión por arco y sometidos a condiciones de desgaste y corrosión durante su servicio se deben identificar los parámetros óptimos de aplicación del recubrimiento, que al contrario de lo que se piensa no son los recomendados por el fabricante de los materiales ya que estos no ofrecen los resultados requeridos, por esta razón y para tener un mejor control de los resultados se realizara un listado de actividades que permitirán el desarrollo de la búsqueda de las mejores condiciones de aspersión y la verificación de estas por medio de las técnicas de microscopia óptica convencional, electrónica de barrido y microscopia de fuerza atómica.

### 1.1. Revisión Bibliográfica

Se realizara la respectiva revisión de los antecedentes concernientes al área de desarrollo del proyecto, así como los resultados obtenidos en las distintas investigaciones que han sido llevadas a cabo a nivel nacional como en el exterior por las diferentes entidades no solo en la empresa privada sino también las instituciones educativas.

### 1.2. Materiales y preparación de las probetas.

Para la primera etapa del proceso se realizó la selección del sustrato en este caso el acero AISI/SAE 4340 en estado bonificado con una sección circular de 80 mm y espesor de 5mm el material fue seccionado y cortado siguiendo las indicaciones del esquema mostrado en la figura 1, cada una de las piezas fueron destinadas para las distintas pruebas y procesos de caracterización.

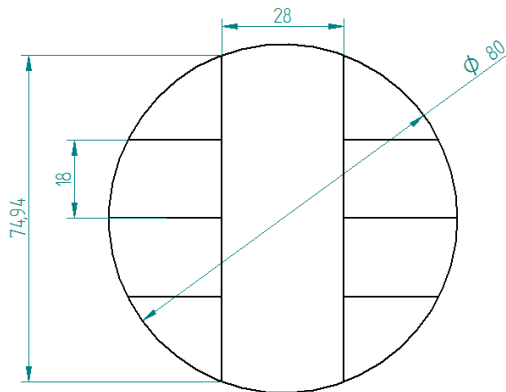


Figura 1. Esquema del diseño de corte de probetas. Fuente: Autor del proyecto

Las muestras fueron seccionadas con disco de carburo previamente a la aspersión, seguido a esto se realizó la preparación superficial de sustrato por medio de chorro abrasivo con óxido de Aluminio <sup>[22]</sup>, para la eliminación de impurezas como óxidos o grasas. Tanto la preparación de los sustratos como la aspersión de los recubrimientos se llevaron a cabo en el astillero de COTECMAR.

### **1.3. Selección de alambres y aspersión térmica.**

Los alambres utilizados en la combinación para el proceso de aspersión fueron seleccionados por su comportamiento en la recuperación de piezas y resistencia ya sea a la corrosión o desgaste así como su capacidad de adhesión y cohesión al ser depositado.

El paso siguiente será establecer los parámetros del equipo de aspersión térmica como lo son las presiones primaria y secundaria de aire, el voltaje y el amperaje del equipo se realizaron la combinación de estos parámetros dependiendo del número de corridas arrojada por el diseño experimental, otros parámetros de control como la distancia de aspersión se dejaron tal cual como fueron establecidos por el fabricante <sup>[23]</sup>; para el depósito del recubrimiento se utilizó el equipo SYSTEM EUTECTIC 4 de proyección térmica por arco del tipo Push/Pull tradicional.

### **1.4. Diseño experimental.**

Diseño ortogonal L9 por el método Taguchi

Esta actividad se realizará acorde al siguiente diseño experimental:

- *Preparación del sustrato:*

- Granallado

- *Prueba piloto con alambre 140MXC:*

Acorde a los resultados obtenidos mediante prueba de adherencia, se seleccionará la mejor condición de preparación del sustrato para generar los recubrimientos con la definición de los factores del proceso.

- *Definición de factores:*

- A: Voltaje
- B: Corriente
- C: Presión de Aire

- *Definición de Niveles de importancia:*

- 1: Bajo
- 2: Medio

- 3: Alto
- *Tipo de Arreglo:*
  - Ortogonal
- *Número de Pruebas:*
  - 9 ( $L_9$ )
- *Arreglo Ortogonal  $L_9(3^{4-2})$*

Se utilizará tanto para el recubrimiento de referencia (alambre 140 MXC), como para las mezclas 140MXC-530AS y 140MXC-560AS

**Tabla 1. Diseño Experimental Arreglo Ortogonal  $L_9(3^{4-2})$**

No. Experimentos	FACTORES			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

### 1.5. Selección y combinación de parámetros.

Basándose en el número de experimentos arrojado por la matriz ortogonal se realizaron nueve corridas distintas tanto para la combinación de los recubrimientos 140MXC-560AS como para la monocapa simultanea 140MXC-530AS; las combinaciones de parámetros para las distintas corridas se encuentran en las tabla 2 y tabla 3.

Tabla 2. Parámetro de aspersión para la combinación 140MXC-560AS

	<b>Presión primaria (bar)</b>	<b>Presión secundarias (bar)</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Amperaje (A)</b>
1	3	4.8	36	80
2	4.8	5	34	160
3	4	4	34	160
4	4.8	4.6	36	120
5	4.8	4.8	36	60
6	5	5	36	60
7	5	5	36	100
8	4.6	5	36	100
9	5	4.4	36	100

Tabla 3. Parámetro de aspersión para la combinación 140MXC-530AS.

	<b>Presión Primaria (bar)</b>	<b>Presión Secundario (bar)</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Amperaje (A)</b>
1	3	3.4	30	140
2	3	3.2	36	40
3	2.8	4.6	36	50
4	3.2	4.6	36	60
5	3.2	4	36	40
6	3.2	4	40	50
7	2.8	4	36	40
8	3	5	35	110
9	2.8	5	36	80

### 1.6. Preparación para las pruebas pertinentes.

Después de ser depositado el recubrimiento se procedió a realizar el corte de las probetas, las secciones elegidas para la caracterización por Microscopia Óptica Convencional fueron resinadas en una maquina empastilladora que es mostrada en la figura 1. Posteriormente se les realizo un proceso de pulido hasta lograr un acabado espejo, en el caso de las pruebas de SEM las secciones de material usadas no fueron alteradas con el fin de tener mayor detalle en la morfología del recubrimiento, Para AFM las preparación pertinente el pulido de las superficies aspersadas con el fin de evaluar de forma eficaz el comportamiento superficial de cada recubrimiento.<sup>[24]</sup>





Figura1. Empastilladora METALOTEST Universidad Libre. Fuente: Autor del proyecto con permiso del laboratorio de análisis de materiales. Facultad de Ingeniería. Universidad Libre.

### **1.7. Análisis Metalográfico.**

Se realizó un pulido de las muestras con papel abrasivo 80, 100, 150, 180, 320, 400, 600, 1000, 1200 seguido por un pulido con alúmina de 3,1 y 0.3 micrómetros.

Para la observación se tomaron micrografías de 5x, 20x y 50x con un microscopio metalográfico OLYMPUS PME 3, a las muestras no se les realizó ningún tipo de ataque lo cual no afectó en la observación del comportamiento intragranular, inclusiones de óxidos y medición de espesores dependiendo de los parámetros de aspersión.

### **1.8. Microdureza.**

Se empleó un micro durómetro Shimadzu, la indentación se realizó con un penetrador de diamante.

Después de realizar ensayos con varias cargas se ha elegido la de 300g ya que esta fue la que menor variación de valores presentó, se realizaron 3 indentaciones con una separación de 40  $\mu\text{m}$ , partiendo desde el límite entre sustrato y el recubrimiento, una zona intermedia y hacia la superficie de recubrimiento con el fin de ver el comportamiento de la dureza en el espesor del depósito.

### **1.9. Microscopia Electrónica de barrido.**

El equipo usado fue un microscopio JEOL NeoScope JCM 5000, facilitado por Tecno academia SENA cazúca, operado con modo de observación de alto vacío y un voltaje de aceleración de 15 Kv. Las observaciones se realizaron en la superficie normal de las muestras a 500X, 1000X, 1500X y 4000X con el fin de observar la morfología del recubrimiento así como las grietas, partículas semifundidas y la condición de porosidad.

Se realizó el análisis de las imágenes con el software Gwiddyon con el cual por medio de análisis estadístico de datos y auto correlación en 2D se establece el tamaño promedio de las partículas semifundidas por medio de una separación de zonas en la muestra inspeccionada.

### **1.10. Microscopia de Fuerza Atómica.**

El equipo usado para esta prueba es de la marca Nanosurf, modelo Easyscan2 facilitado por el laboratorio de nanotecnología de la Pontificia Universidad Javeriana. Los barridos se hicieron por la técnica de contacto con una fuerza aplicada de 22nN de manera constante.

Las mediciones se realizaron con punta de Si y la obtención de las imágenes se realizó por medio de dos cámaras LCD conectadas a la cabeza del microscopio. FlexAFM. EL barrido se realizó previa exploración en 4 regiones diferentes de 5 micrómetros cuadrados de área.

### **1.11. Fluorescencia de rayos X**

Para esta prueba se usó un equipo de fluorescencia OXFORD X-MET 7500 propiedad de la empresa APP MACHINES, el análisis se realizó con el método para metales de la librería propia del equipo y con un tiempo de exposición de 15 segundos, para su posterior estudio con el software de análisis del X-MET.

### **1.12. Análisis de resultados y conclusiones.**

Se establecerá una comparación entre la caracterización de los diferentes alambres usados en las técnicas de aspersión y generar un documento con estos.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1. ASPERSION TERMICA:

Dicha técnica deposita el material fundido a altas temperaturas y rociado a gran velocidad sobre la superficie de una pieza base o sustrato, para conferirle mejores propiedades físicas y químicas, aumentando su resistencia. De esta forma el proceso realizado sobre el material base le brindara un aumento considerable de vida útil no solo a daños generados por el medio ambiente (corrosión) sino también a posibles daños por desgaste. Esta técnica debe su gran fuerza de cohesión al anclaje mecánico obtenido por el aprovechamiento de la energía cinética generada por las grandes velocidades alcanzadas durante el proceso.<sup>[9]</sup>

Distintas técnicas de aspersión térmica permiten la variación de resultados que se quieren obtener debido a las diferentes formas en las que se presentan y generan el chorro de partículas y de esta misma forma se obtiene la siguiente clasificación:

#### 2.1.1. Aspersión Por Llama.

##### Principios:

“Así se denomina el sistema que utiliza gases combustibles como fuente de combustión (Figura 2.) y generalmente es el más aplicado. El material del recubrimiento es compuesto por elementos ferrosos como: aleaciones de aluminio con zinc y aceros inoxidables, se utilizan en polvo, barras o alambres”.<sup>[10]</sup>

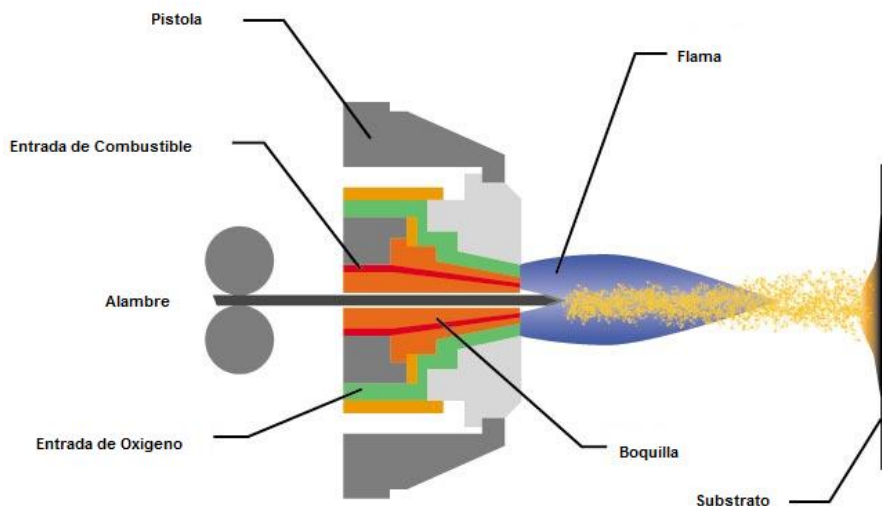


Figura 2. Esquema Aspersión por Llama. Fuente: [www.Haydencorp.com](http://www.Haydencorp.com)

### 2.1.2. Aspersión por Plasma.

#### Principios:

El sistema de plasma incorpora un cátodo y un ánodo separados por una pequeña distancia dentro de una cámara. Corriente continua es aplicada al cátodo formando un arco con el ánodo, al mismo tiempo que los gases pasan por la cámara.

El arco eléctrico generado es tan potente que separa los gases en electrones a un estado de materia conocido como plasma (Figura 3). Mientras el plasma inestable se recombina de nuevo a su estado gaseoso, energía térmica es liberada.<sup>[11]</sup>

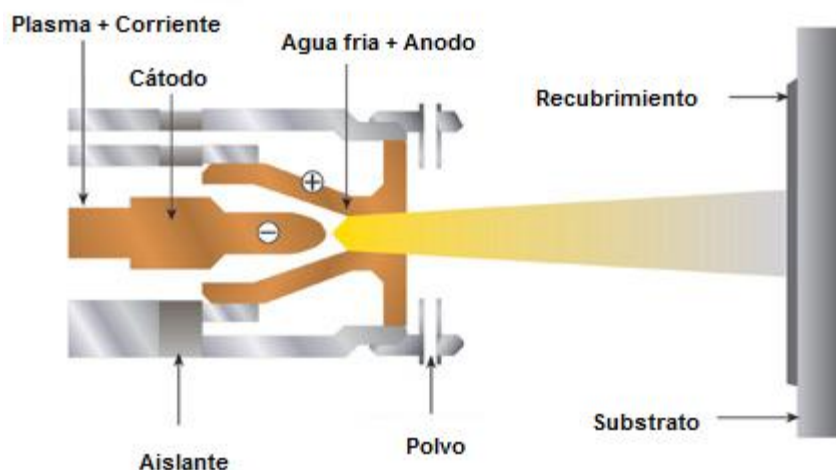


Figura 3. Esquema Aspersión por Plasma. Fuente: Thermalspray.com

### 2.1.3. Aspersión de Alta velocidad (HVOF).

#### Principios:

“El procedimiento se denomina HVOF, como un acrónimo del término en inglés, y utiliza una combinación de oxígeno con diversos gases combustibles incluido el hidrógeno, propano, propileno de hidrógeno e incluso el queroseno (Figura 4.). Gracias a la alta fuerza cinética que se obtiene por la explosión súbita del gas, las micropartículas se desplazan a velocidades superiores de mach 1”.<sup>[12]</sup>

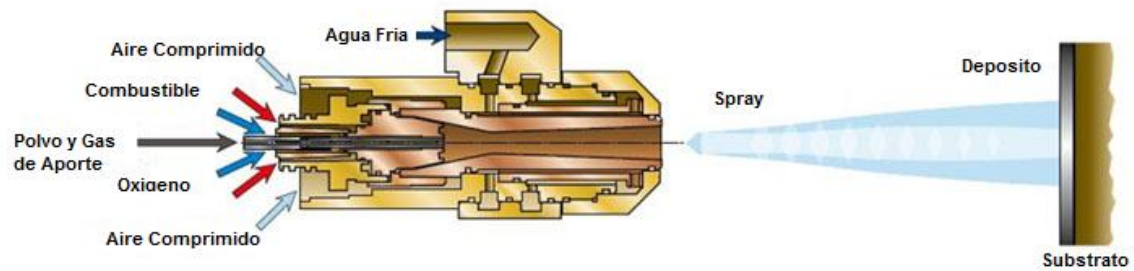


Figura 4. Esquema Aspersión de Alta Velocidad (HVOF). Fuente: Sultzner.

#### 2.1.4. Aspersión por arco eléctrico (AS).

##### 2.1.4.1. Principios:

“Se diferencia de los otros procesos de Proyección Térmica porque no implica fuentes externas de calor, como pasa en la combustión por gas y oxígeno de los procesos con llama. La calefacción y la consecuente fusión son generadas a partir de la reacción de dos alambres opuestos, en forma de arco y eléctricamente cargados Figura 5” <sup>[13]</sup>.

La ventaja más destacada de esta técnica de aspersión es el no requerir de gas combustible bajando considerablemente los costos del proceso en comparación con las demás técnicas pero a su vez se obtiene una mayor porosidad en el depósito.

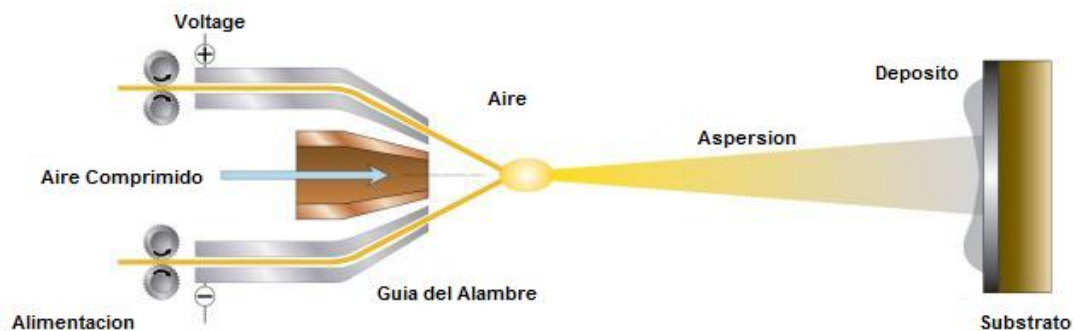


Figura 5. Esquema de Aspersión por Arco eléctrico. Fuente: Highpowermedia.

En el caso puntual del Proyecto nos enfocaremos en la técnica de aspersión por Arco eléctrico.



Figura 6. Equipo de Termoaspersión por Arco Eléctrico. Fuente: Castolin Eutectic

#### 2.1.4.2. Parámetros del proceso.

Los parámetros propios del proceso junto con otros aspectos tanto del material de aporte como de preparación del sustrato definen el resultado final del depósito

- Potencia eléctrica: Con un máximo de 12 Kw (Constante) <sup>[14]</sup>.
- Temperatura en el arco: valores de 6100K con corrientes de 280 A. <sup>[15]</sup>
- Voltaje en el arco: se encuentra en el rango de 20 a 40 v.
- Flujo: Por encima de los 18 Kg/hr (Variable) <sup>[16]</sup>.
- Materiales: Materiales de buena conductividad eléctrica como: Zn, Al, Mo o aleaciones NiCr, NiAl, o NiCrAl, y alambres con núcleos.
- *Velocidad de partícula*: las partículas pueden obtener velocidades mayores a los 150 m/s <sup>[17]</sup>.
- *Presión de gas atomizador*: está en el rango desde los 0.2 MPa a 0.7 MPa.

#### 2.1.4.3. Propiedades y características del proceso.

Aumentar la resistencia de los materiales a la corrosión en más de un 80 por ciento y brinda un mejoramiento la resistencia al desgaste y fricción de las piezas (Tabla 4). Así como el de la barrera térmica para contrarrestar los efectos de altas temperaturas <sup>[18]</sup>.

Tabla 4: Características del proceso de Aspersión Térmica por arco.

Flujo de gas (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura del Proceso (C°)	Velocidad de impacto (m/s)	Resistencia relativa a la adhesión	Resistencia a la cohesión	Velocidad max. De Atomización (Kg/h)	Energía requerida para Fundir (Kw/Kg)
71	5500	240	Alta	Alta	16	0,2-0,4

Fuente: ASM Handbook of Thermal Spray Technology

El proceso como tal busca como resultado obtener un recubrimiento de la más alta calidad no solo mediante la temperatura adecuada de fusión o el tiempo de permanencia de la partícula, sino que se rige por la presión de gas de atomización, las características del recubrimiento y la energía que actúa en el proceso, en la figura 7 se ve una esquematización de las principales características que influyen en la calidad del resultado en el proceso de aspersión.

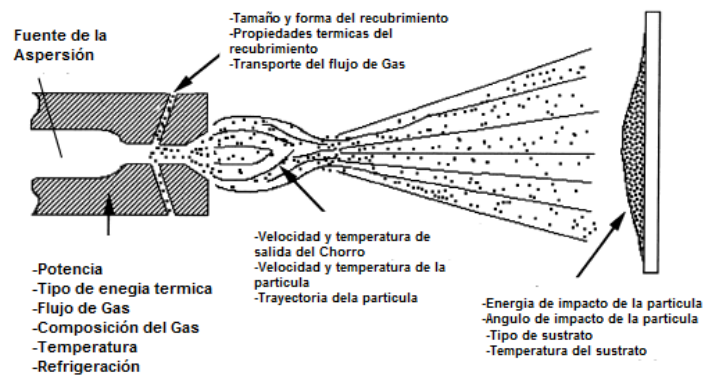


Figura 7. Parametros y variables típicas del proceso de Termo Aspersión. Fuente: ASM Handbook of Thermal Spray Technology

Variables como la temperatura y la velocidad final de la partícula se ven afectadas no solo por la trayectoria de la misma sino también por las fuerzas de resistencia que se encuentran entre el chorro de aspersión y la partícula ya que por medio de estas fuerzas se llegaría a generar una mayor energía de reacción en el proceso, esto significa un aumento tanto en la velocidad como en la energía de impacto dando como resultado un grado mayor de deformación en las partículas obteniendo una mejor calidad en el recubrimiento, que a su vez en combinación con los parámetros operacionales del equipo brindan unas características de suma importancia para determinar las propiedades del recubrimiento, como las capas de Splat, las partículas semifundidas y posibles inclusiones que se ven esquematizadas en la figura 8 junto con otros defectos característicos de los depósitos aspersados.

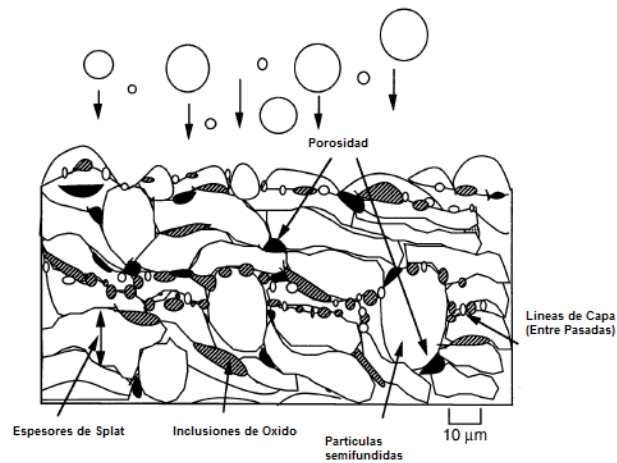


Figura 8. Fallas comunes en recubrimientos Termo aspersados. Fuente: ASM Handbook of Thermal Spray Technology.

#### 2.1.4.3.1. Splats.

Es el termino que se le da a la geometría aplastada obtenida cuando el material de aspersión impacta sobre el sustrato generando laminillas como se muestra en la figura 9, muchas de estas laminillas se traslapan y adhieren unas con otras llenando los espacios que se encuentran entre ellas (intersticios) generando poco a poco una capa uniforme de recubrimiento, si estos espacio que se encuentran entre las laminillas no son llenados se convertirán en poros que formaran parte del recubrimiento<sup>[19]</sup>.

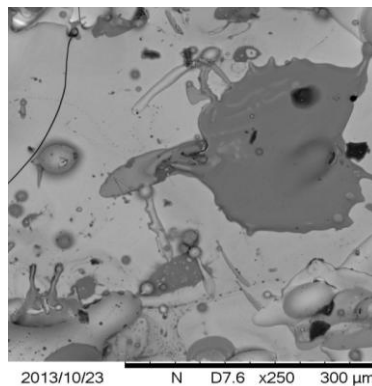


Figura 9. Estructura laminar típica del proceso de Termo aspersión. Fuente: Autor del Proyecto



#### 2.1.4.3.2. Porosidad.

La porosidad es otra de las características de recubrimiento importante que influye fuertemente en sus propiedades y al igual que las inclusiones de óxido llega a ser una característica no deseable. La porosidad crea una mayor tasa de desgaste y de corrosión y es asociada generalmente a un alto número de partículas semifundidas como se muestra en la figura 10. Una condición de Splat pobre llega a generar deslizamientos o porosidades abiertas, permitiendo el ataque de elementos al material base y afectando la resistencia a la corrosión inherente del revestimiento así como la dureza del mismo <sup>[19]</sup>.

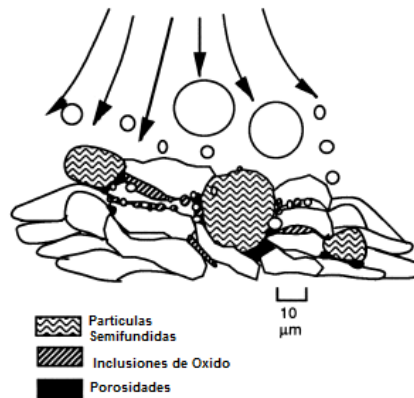


Figura 10. Defectos típicos en Termoaspersión. Fuente: ASM Handbook of Thermal Spray Technology.

Esto quiere decir que las condiciones microestructurales del recubrimiento influyen de gran manera el comportamiento mecánico, que está definido por la fuerza de contacto entre las laminillas y las fuerzas de cohesión y adhesión de estas laminillas con el sustrato <sup>[20]</sup>.

La porosidad puede provenir de las siguientes causas:

- Contracción del material durante el enfriamiento desde el estado líquido.
- Partículas sin fundir, parcialmente fundidas, o resolidificada, que dan lugar a espacios vacíos.
- Mala cohesión intrasplat, lo que lleva a la separación de los splats.
- Mala humectación en superficies adyacentes, o splats que pueden resultar a partir de partículas frías o de lento movimiento de las mismas o fenómenos de tensión superficial o agrietamiento.
- Ángulos altos de deposición.
- Partículas de enmascaramiento que permite que las partículas enfriar antes de impactar con la superficie de revestimiento.
- La porosidad inherente a la fabricación de polvo de materia prima proceso <sup>[19]</sup>.

#### 2.1.4.3.3. Inclusiones de Oxido.

Las Inclusiones de óxido en recubrimientos metálicos son generalmente visto como, fases oscuras y alargadas que aparecen como cadenas en el recubrimiento por su sección transversal, paralelo al sustrato. Estos son generados por la interacción del ambiente circundante en este caso aire con las partículas calientes lo que conduce películas de óxidos o nitruros a la superficie del recubrimiento <sup>[19]</sup>.

En algunos casos se busca la generación de estos oxido y nitruros con el fin de disminuir la conductividad eléctrica del recubrimiento <sup>[20]</sup>.

Siempre se busca disminuir la aparición de las inclusiones al mínimo algunos parámetros que se varían para lograr esto son:

- Extracción del entorno reactivo, a través del uso de gas inerte cubiertas o cámaras.
- La reducción de la temperatura media de las partículas mediante la reducción de la calefacción de los chorros.
- Reducción del tiempo de permanencia de las partículas, reduciendo al mínimo la distancia de aspersión cada vez con mayores velocidades.
- Reducción de los deltas de temperatura sustrato / recubrimiento con chorros de aire o el aumento de la velocidad del dispositivo de Aspersión térmica.

## 2.2. Equipo.

El equipo a utilizar es el SYSTEM EUTECTIC 4 de proyección térmica por arco del tipo Push/Pull tradicional, en el cual los alambres son empujados por un motor ubicado cerca de la bobina y a su vez halado por un motor secundario ubicado en la pistola. La figura 11 muestra la configuración del equipo y la tabla 5 sus características



Figura 11. Equipo de aspersión térmica System Eutectic 4. Fuente: [<http://www.castolin.com>]

Tabla 5 Características del equipo de deposición por arco eléctrico  
SYSTEM EUTECTIC 4

CARACTERÍSTICAS DE SALIDA	VALORES
Intensidad de proyección	0-350 A
Voltaje	0-50 V DC
Aire de atomización	1.23 m3 /min a 5.5 bar

Fuente: [<http://www.castolin.com>]

## 2.3. Materiales.

### 2.3.1. Acero AISI/SAE 4340.

Acero de mediana aleación para la fabricación de piezas con altas exigencias mecánicas de gran tamaño, se caracteriza por su gran combinación de ductilidad, tenacidad y resistencia a la fatiga, en la tabla 6 se observa su composición química.

Tabla 6. Composición Química Acero AISI/SAE 4340. Fuente: Compañía General de Acero

Composición Química	C%	Mn %	P max. %	S max. %	Si max. %	Cr %	Mo %	Ni %
Análisis	0.38	0.6	0.035	0.04	0.15	0.7	0.2	1.65
Típico %	0.43	0.8			0.35	0.9	0.3	2.0

### 2.3.2. Material 530 AS.

Eutronic arc 530 es manganeso compensado, alambre de acero al medio carbono desarrollado específicamente para el proceso de doble arco de alambre. Los recubrimientos producidos son convenientes para una amplia gama de aplicaciones de reconstrucción donde la dureza no es crítica pero donde la capa de bajo costo es un factor limitante, otras propiedades se ven en la tabla 7. Se recomienda realizar una preparación previa de la superficie del material base <sup>[21]</sup>.

En la tabla 8 se muestran los parámetros recomendados de aspersión.

Tabla 7. Parámetros de Aspersión Recomendados. Fuente: Castolin Eutectic.

PARAMETRO	VALOR
PRESION DE AIRE	50-60 psi
VOLTAJE	28-30 V
AMPERAJE	100-300 A
DISTANCIA DE ASPERSION	4-7 In

Tabla 8. Propiedades del alambre. Fuente: Castolin Eutectic

PROPIEDADES	VALOR
Composición Química	Fe, 0.15C, 0.8Mn, 0.2Si
Dureza(HRB)	95-100
Adherencia (psi)	5800
Diámetro del alambre (in)	1.6
Eficiencia de Deposición (%)	80
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	6.78
Tasa de Atomización (lbs/hr)	10
Punto de Fusión (°C)	1500

### 2.3.3. Material 560 AS.

Eutronic arc 560 es un acero tipo 420 inoxidable, alambre con especificaciones de diseño para el proceso de arco de doble alambre. Los recubrimientos producidos son densos, bien adheridos y exhiben excelente resistencia a la abrasión suave y a la corrosión. Eutronic arc 560 son recubrimientos ampliamente utilizados para la reparación de elementos de máquina y aplicaciones de restauración dimensional. Las características de baja contracción hacen del Eutronic arc 560 una opción excelente para aplicaciones que requieren una acumulación gruesa <sup>[22]</sup>.

Las tablas 9 y 10 muestran los parámetros recomendados y las propiedades físicas respectivamente.

Tabla 9. Parámetros de Aspersión Recomendados. Fuente: Castolin Eutectic.

PARAMETRO	VALOR
PRESIÓN DE AIRE	50-60 psi
VOLTAJE	28-30 V
AMPERAJE	100-200 A
DISTANCIA DE ASPERSIÓN	4-6 in

Tabla 10. Propiedades del alambre. Fuente: Castolin Eutectic

PROPIEDADES	VALOR
Composición Química	Fe, 13Cr, 1Mn, 1Si, 0.3C
Dureza (HRC)	40-45
Adherencia (psi)	4700
Diámetro del alambre (in)	1/16
Eficiencia de Deposición (%)	70-80
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	6.74
Tasa de Atomización (lbs/hr)	10
Consumo del Alambre (oz/ft <sup>2</sup> /0.001 in)	0.8
Resistencia a la Corrosión	Excelente
Coeficiente de Expansión Térmica (in/in °F)	6.6x10 <sup>-7</sup>
Maquinabilidad	Excelente con herramientas de carburo convencional
Punto de Fusión (°C)	1427

#### 2.3.4. Material 140MXC.

Aleación creada por Praxair Surface Technologies. Es un deposito con estructura nanocompuesta, consiste en un alambre tubular de hierro ferrita relleno con polvos de cromo, Boro, Molibdeno, Tungsteno, Manganeseo, Carbono, Niobidio y Silicio de tamaños que varían desde pocos nanómetros hasta 200µm. Debe ser mecanizado únicamente con piedra abrasiva de óxido de silicio u óxido de aluminio, el alto contenido de cromo hace factible su aplicación en algunos medios corrosivos y como barrera térmica.

El fabricante sugiere no realizar un pre calentamiento del sustrato para la aplicación del recubrimiento. La tabla 11y la tabla 12 muestran los parámetros de aspersion sugeridos por el fabricante y las propiedades generales del material respectivamente <sup>[23]</sup>.

Tabla 11. Parámetros de Aspersión Recomendados. Fuente: Praxair.

PARAMETRO	VALOR
PRESIÓN DE AIRE PRIMARIA	345-413 Kpa
PRESIÓN DE AIRE SECUNDARIA	275Kpa
VOLTAJE	29-32 V
AMPERAJE	175 A
DISTANCIA DE ASPERSIÓN	10 cm

Tabla 12. Propiedades del alambre. Fuente: Praxair.

PROPIEDAD	VALOR
Composición Química	Fe, 25Cr, 5B, 6Mo, 15W, 3Mg, 4C, 12Ni, 2Si
Diámetro del alambre (in)	1/16
Eficiencia de Deposición (%)	80 %
Adherencia (psi)	6000-8000
Dureza (HRC)	65-67
Porosidad (%)	1.9-3
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	7.8

## 2.4. MICROSCOPIA OPTICA.



Figura 12. Microscopio Metalográfico Universidad Libre.

Fuente: Autor del proyecto con permiso del laboratorio de análisis de materiales. Facultad de Ingeniería. Universidad Libre.

Como una muestra mecanográfica es opaca a la luz, la misma debe ser iluminada por luz reflejada. Un haz de luz horizontal de alguna fuente de luz es reflejado, por medio de un reflector de vidrio plano, hacia abajo a través del objetivo del microscopio sobre la superficie de la muestra. Un poco de esta luz incidente reflejada desde la superficie de la muestra se aplicara al pasar a través del sistema inferior de lentes y del objetivo, continuando así a través del reflector de vidrio plano realizando una vez más una amplificación en el sistema superior de lentes (Figura 13).

No obstante, en la microscopía óptica suele emplearse distintos tipos de iluminación que la luz blanca, pues si bien no aportan mayor resolución si permiten facilitar la separación de los incidentes observables, como lo son:

- a) Campo oscuro.
- b) Luz polarizada.
- c) Técnica de Nomarsky.

Las que se desarrollarán en las experiencias con mayor profusión.

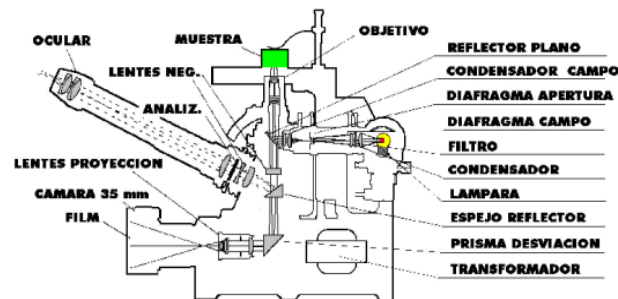


Figura 13. Estructura Microscopio Óptico Convencional. Fuente: [materias.fi.uba.ar](http://materias.fi.uba.ar)

## 2.5. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

El principio del sistema SEM consiste en que si se hace incidir sobre la muestra un haz de electrones finamente enfocado, emite una señal que puede registrarse en una pantalla mediante un tubo de rayos catódicos.

Disponen de un cañón de electrones que emite los electrones que chocan contra el espécimen, creando una imagen aumentada. Se utilizan lentes magnéticas para crear campos que dirigen y enfocan el haz de electrones, ya que las lentes convencionales utilizadas en los microscopios ópticos no funcionan con los electrones.

Los componentes principales del microscopio de barrido SEM (Figura 14) son los siguientes:

### 2.5.1. Fuente de Energía

La fuente de energía del microscopio electrónico de barrido depende de varios factores, siendo los más importantes el voltaje de aceleración, la intensidad de la corriente y el diámetro del haz.

En unos puntos el haz de electrones es desviado por los campos magnéticos controlados por el generador de barrido. Como consecuencia el haz es movido sobre la superficie de la muestra y la señal es detectada por el colector de electrones. <sup>[24]</sup>

### 2.5.2. Porta muestras.

La muestra montada sobre un soporte puede moverse en tres direcciones, ser calentada, enfriada, estirada, etc. Para el estudio de ciertos tipos de muestras tales como, metales, minerales, se requiere calefacción de la muestra. La calefacción puede conseguirse por medio de un hilo incandescente o calentando la muestra en un crisol aplicando directamente una corriente eléctrica.



Figura 14. Equipo de Microscopia Electrónica de Barrido Tecno Academia SENA. Fuente: Autor del proyecto.

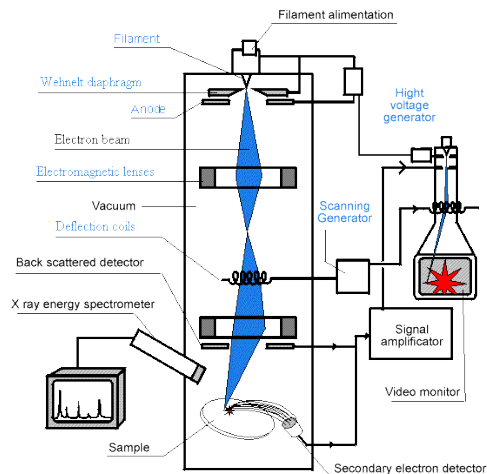


Figura 15. Esquema Microscopio Electrónico de Barrido. Fuente: Materiaux



## 2.6. MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA (AFM)

El Microscopio de Fuerza Atómica (“Atomic Force Microscope”, AFM) es la extensión más directa del microscopio de efecto túnel y es especialmente útil en el estudio de superficies de materiales no conductores. Este instrumento, en lugar de detectar la corriente túnel entre la punta y la muestra, controla la fuerza que experimenta la punta al aproximarse a la superficie del material (aislante o conductor). El AFM también se está utilizando para realizar estudios de abrasión, adhesión, limpieza, corrosión, “etching”, fricción, lubricación, enchapado y pulido <sup>[25]</sup>.

El esquema básico de funcionamiento del equipo se puede ver en la figura 16.

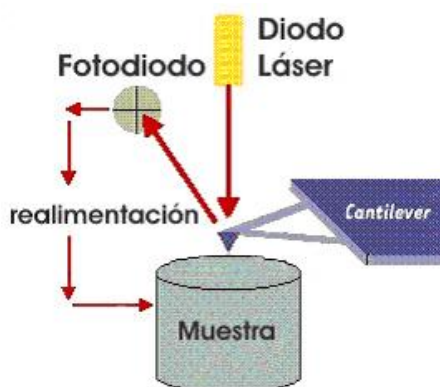


Figura 16. Esquema básico de funcionamiento del AFM. Fuente: aportes.educ.ar

### 2.6.1. Técnicas.

En función de la interacción entre la punta y la superficie de la muestra, el AFM se puede clasificar como modo repulsivo o de contacto (Contact mode), modo atractivo o no contacto (Noncontact mode) y el modo Tapping en el cual la punta hace un contacto intermitente con la muestra a evaluar.

### 2.6.2. Principios básicos de trabajo

Los principios básicos por los que se rige el trabajo de un AFM son muy sencillos. Una punta muy fina se barre de manera automática sobre una superficie mediante un mecanismo de retroalimentación que permite que unos scanners piezoeléctricos mantengan la punta interaccionando con la superficie a fuerza constante (de esta manera se obtiene información de alturas, topográfica).

Las puntas se fabrican normalmente de silicio o nitruro de silicio extendidas hacia abajo desde el final del cantiléver <sup>[25]</sup>.

## 2.7. MICRODUREZA.

La dureza es la propiedad de la superficie un material de resistirse a la deformación elástica y plástica, en presencia de esfuerzos de contacto ocasionados por otro cuerpo más duro el cual no sufre deformaciones este cuerpo es conocido como indentador o penetrador, el cual posee una forma y dimensión especificada <sup>[26]</sup>. El equipo usado se puede ver en la figura 17.



Figura 17. Micro durómetro Universidad Libre. Fuente: Autor del proyecto con permiso del laboratorio de análisis de materiales. Facultad de Ingeniería. Universidad Libre.

En las mediciones de dureza Vickers se hace penetrar un indentador de forma piramidal cuya geometría se observa en la figura 18. La utilización de la pirámide tiene las siguientes ventajas:

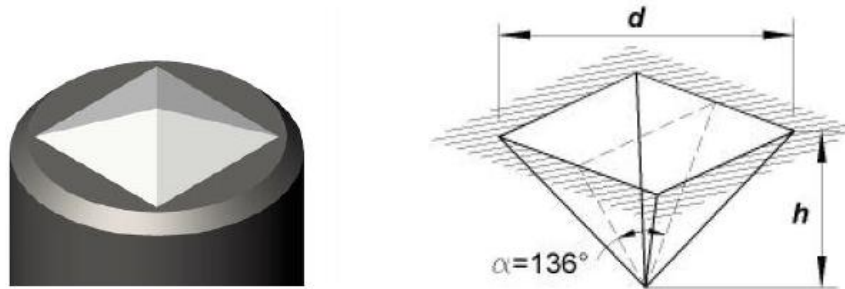


Figura18. Indentador piramidal Vickers. Fuente: Guia de laboratorio UTP.

- Las improntas resultantes son bien perfiladas facilitando la medición.
- La geometría de la impronta es semejante por lo que la dureza en el material es constante sin importar la longitud de las caras.
- La dureza de la pirámide coincide con la dureza Brinell para los materiales de dureza media.
- El ensayo es aplicable para todo material sean duros o blandos y es perfecto para ensayos en probetas delgadas y capas superficiales.

El estándar ASTM E92 define hacer el ensayo con una maquina calibrada la cual fuerza un indentador piramidal con un ángulo entre caras específico bajo una carga determinada y se mide la diagonal resultante después de retirar la carga como se observa en la figura 19. La medición del valor de dureza se realiza con la siguiente ecuación.

$$HV = 1,8544 \frac{P}{d^2}$$

Donde P es la carga que se aplica con un rango de 1 a 120 Kgf, y del valor medido de la diagonal resultante.

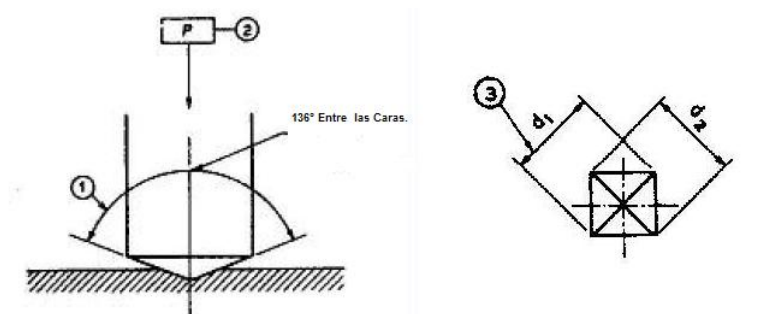


Figura 19. Ensayo Vickers. Fuente: Estándar ASTM E 92.

## 2.8. Fluorescencia de Rayos X (FRX).

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra <sup>[27]</sup>.

La aplicación de FRX para la identificación de la composición de los materiales tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas.

Los rayos X poseen una energía tal que al incidir sobre la muestra pueden ionizarla expulsando electrones de las capas más internas. Estos iones son altamente inestables y esas vacantes son ocupadas por electrones de capas superiores en cascada. Estos saltos de electrones de un nivel de mayor energía a uno de menor desprenden una radiación característica que es la fluorescencia de rayos X (figura 20) <sup>[28]</sup>.

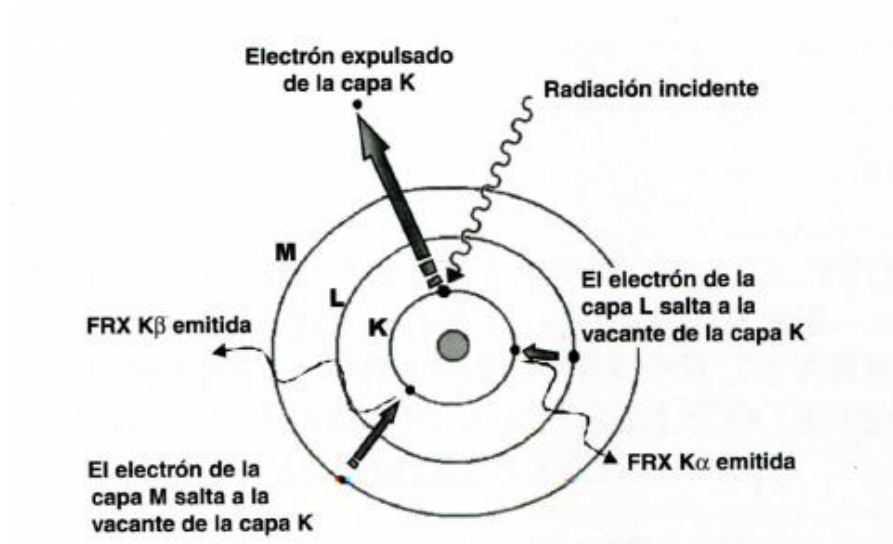


Figura 20. Esquema de la emisión de la radiación de fluorescencia de rayos X



Figura 21. Equipo de fluorescencia de rayos X. Fuente: Autor del proyecto con autorización de APP MACHINES.

### 3. MARCO NORMATIVO

La normativa internacional usada en la realización del proceso de aspersión térmica es la norma ISO 12690:2010, donde se brindan recomendaciones tanto de seguridad como técnicas del procedimiento para garantizar las mejores condiciones y resultados en la termo aspersión o tras normas que serán necesarias para la correcta elaboración del proyecto son:

- MIL-STD-1687, Thermal Spray Process for Naval Ship Machinery Applications.
- SSPC-SP 10/NACE No 2, Near-White Metal Blast Cleaning.
- NACE standard RP0287, Field Measurement of Surface Profile of Abrasive Blast Cleaned Steel Surfaces Using a Replica Tape.
- AS – 1: “Arc Spraying Zinc, Aluminum and Their Alloys and Composites for Corrosion Protection of Steel”.
- AS – 2: “Arc Spraying Metal Alloys for Engineering Purposes”.
- . ASTM E92-82(2003)e2 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials (Withdrawn 2010)

#### 4. MARCO CONCEPTUAL

**Aspersión Térmica:** Consiste en proyectar pequeñas partículas fundidas, semifundidas, calientes e incluso frías que se unen a una superficie, con el fin de proveer un tratamiento superficial <sup>[28]</sup>.

**Nanocompuesto:** Material formado por la unión de dos o más materiales trabajados para conseguir la combinación de propiedades que no se obtiene en materiales originales <sup>[29]</sup>.

**Perfil de Anclaje:** Grado de rugosidad que posee un material en la superficie para facilitar la mejor adherencia del recubrimiento.

**Pistola de aspersión:** Elemento mecánico que se utiliza como atomizador y a la vez de punto de agarre del operario.

**Poder de resolución:** Se define como la capacidad de un objetivo para producir imágenes separadas y distintas de dos detalles del objeto muy próximos.

**Porosidad:** Cantidad de poros en un área determinada.

**Profundidad de campo:** También denominada penetración o resolución vertical del objetivo, es la capacidad de dar imágenes nítidamente enfocadas, cuando la superficie del objeto no es completamente plana.

**Recubrimiento:** Capa de material (inorgánico u orgánico) que se utiliza para proteger o embellecer algún área determinada.

**Sustrato:** Pieza o superficie a recuperar o recubrir.

**140 MXC:** Nanocompuesto en forma de alambre de 1/16 de pulgada de espesor utilizado en la termo aspersión por arco, manipulado para recubrir el sustrato, consta de fases amorfas y nanocristalinas, al aplicarse sobre el material ofrece propiedades únicas como: Alta Dureza, resistencia al desgaste y a la corrosión.

**530 AS:** Recubrimiento en forma de alambre de 1.6 pulgadas de espesor compuesto por acero de bajo carbono de propiedades similares al acero 1040.

**560 AS:** Recubrimiento en forma de alambre de 1/16 de pulgada de espesor compuesto por acero inoxidable de tipo martensítico.

## 5. CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS.

### 5.1. Análisis Metalográfico de los recubrimientos.

#### 5.1.1. 140MXC-530AS.

En las figuras 22 a 30 se muestran las estructuras de los recubrimientos en monocapa simultánea las imágenes fueron tomada en su área transversal con el fin de identificar porosidades internas (**círculos rojos**), inclusiones de óxidos entre Splats (**círculos verdes**), así como la posibilidad de grietas entre las capas y realizar mediciones de condición de espesor en los recubrimientos y la variación de los mismos según sus parámetros de aspersión.

En la figura 22 (a) se observa el recubrimiento de la muestra M1 de la monocapa simultánea de 140MXC-530AS en la cual por las características propias del material 140MXC la superficie no permite ser atacada con ningún reactivo<sup>[19]</sup>, por lo cual en esta muestra se ve de forma combinada zonas de color más oscuro estas zonas corresponde al material 530AS, en esta figura se puede observar el comportamiento típico de estos dos recubrimientos aspersados con parámetros que se encuentran dentro de los rangos establecidos por el fabricante. Se encuentra en gran cantidad y de gran tamaño porosidades a lo largo de la muestra lo que demuestra el predominio del recubrimiento 530AS ya que este tipo de defecto es común en este material, así como también se una gran cantidad de inclusiones de oxido dirigidas hacia el límite con el sustrato<sup>[29]</sup>.

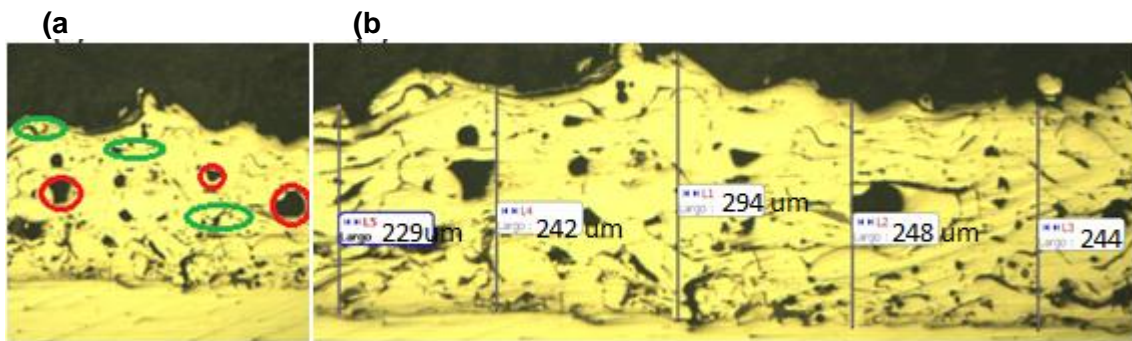


Figura 22. Muestra M1 Metalografía a 5x (a). Comportamiento del recubrimiento. (b). Condiciones de espesor a

En las figuras 23 y 24 se muestra un aumento considerable en la formación de inclusiones de óxidos entre las capas de los splats esto se debe a tres razones correspondientes a los parámetros de aplicación, la primera es por las bajas presiones primarias del equipo que aumentan el tiempo de permanencia de las partículas en el chorro de aspersión la segunda es el bajo amperaje usado en el proceso generando una disminución en la velocidad de la tasa de aspersión, dando espacio a la captura de partículas de aire causante de dichas inclusiones, Las inclusiones de óxidos entre los splats cercanos al sustrato pueden depender de la variación de la presión de aire tanto primario como secundario, además se tendría que considerar el ambiente de aplicación.



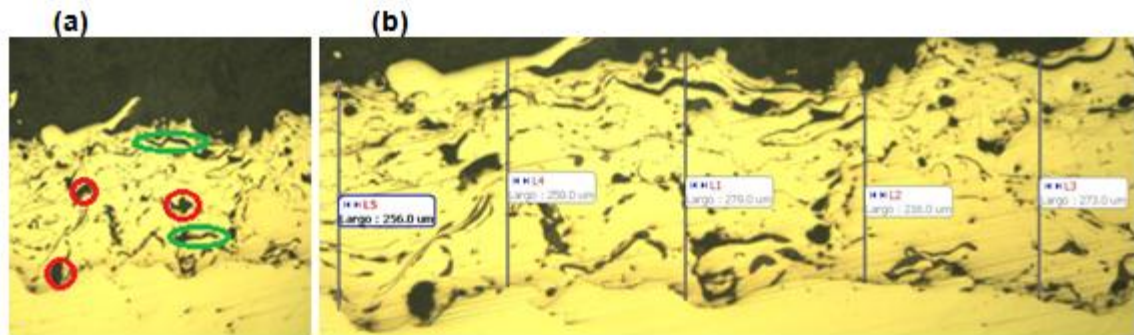


Figura 23. Muestra M2 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5X (b). Condiciones de espesor a 10X

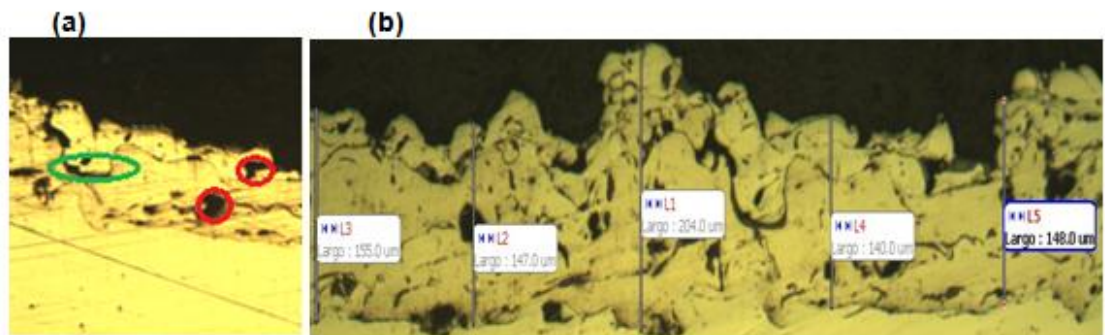


Figura 24. Muestra M3 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5X. (b). Condiciones de espesor a 10X

En la figura 25 se muestra una gran disminución en inclusiones entre splats y poros interconectados, así como una mayor uniformidad entre los materiales aspersados y un significativo aumento en el espesor ya que se encuentra en un promedio de los 480  $\mu\text{m}$ , muy cercano al espesor óptimo para este tipo de aplicaciones.<sup>[30]</sup>, aun así muestra una condición extraña de vacío entre el recubrimiento y el sustrato el cual pudo haberse originado por una inadecuada preparación del sustrato afectando el anclaje mecánico de la primera capa aspersada así como contracciones al enfriarse el material generando un desprendimiento en la intersección de los materiales.



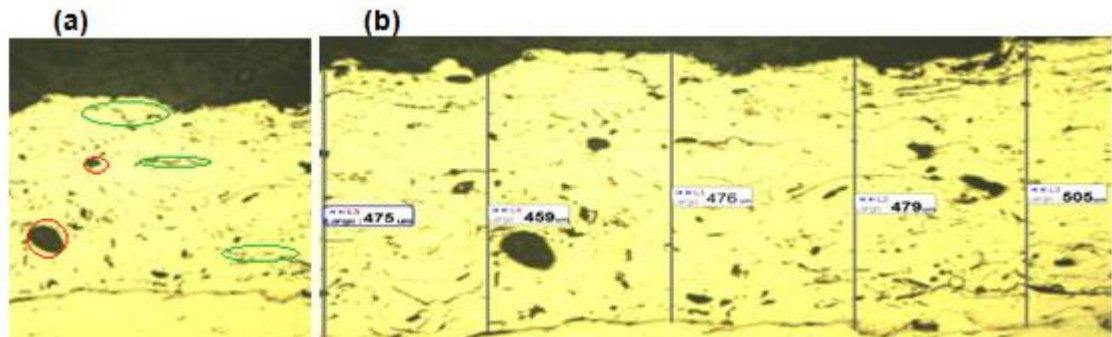


Figura 25. Muestra M4 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5X. (b). Condiciones de espesor a 10X.

Los vacíos observados en las muestras M5 y M6 pueden depender de los parámetros de aspersión que generaron Splat de mayor área lo que ocasionó el no llenado uniforme entre las capas por esta razón los vacíos tiene esta alargada q se muestra con más detalle en la figura 26, para la figura 27 en la parte inferior del recubrimiento se va notando como las divisiones entre splats desaparecen en algunas zonas, esto se debe a la rugosidad formada por gotas de la capa anterior del recubrimiento lo que ayuda a un mejor anclaje mecánico en los splats. En términos generales se encuentra un comportamiento bastante similar entre estas dos muestras puesto al remitirnos a la tabla 3 observamos que los parámetros usados en las dos aplicaciones varían muy poco.

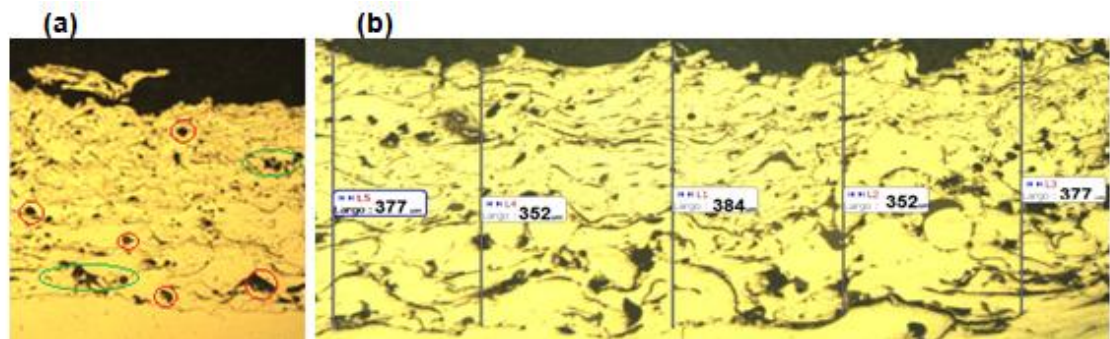


Figura 26. Muestra M5 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5x. (b). Condiciones de espesor a 10X.



Figura 27. Muestra M6 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5X. (b). Condiciones de espesor a 10X.

Los vacíos observados tanto en la figura 28 como en la 29 pueden ser ocasionados por el bajo valor de amperaje usado en la deposición del material que se encuentra por debajo del recomendado, este parámetro es de suma importancia en materiales como el 140MXC ya al no generar debidamente el arco entre los alambres la fusión del Nanocompuesto va a ser muy deficiente por lo cual no va a llegar con la fluidez suficiente para llenar con éxito los espacios.<sup>[29]</sup>

También se llegan a observar similitudes en el comportamiento del espesor de película esto puede pasar no solo por las altas presiones usadas al momento de recubrir sin embargo en este caso existe una variable independiente del mismo proceso que es la habilidad del operario el cual al ser ya experimentado puede llegar a mantener una condición de espesor muy similar en distintas corridas.

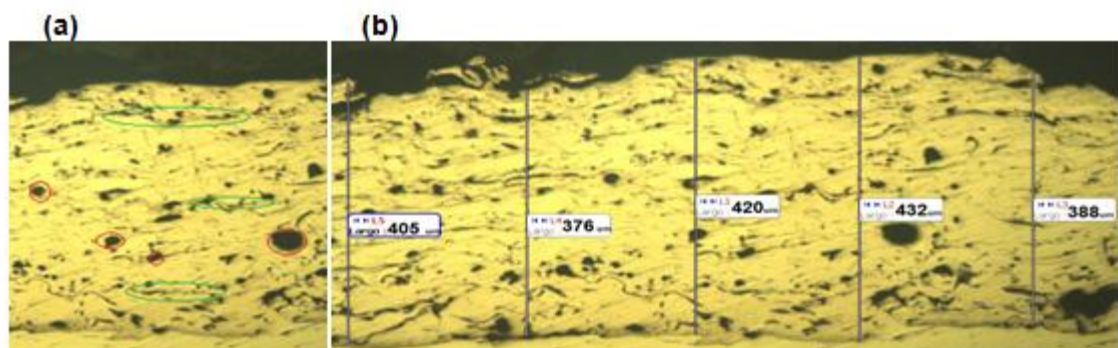


Figura 28. Muestra M7 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5x. (b). Condiciones de espesor a 10x.

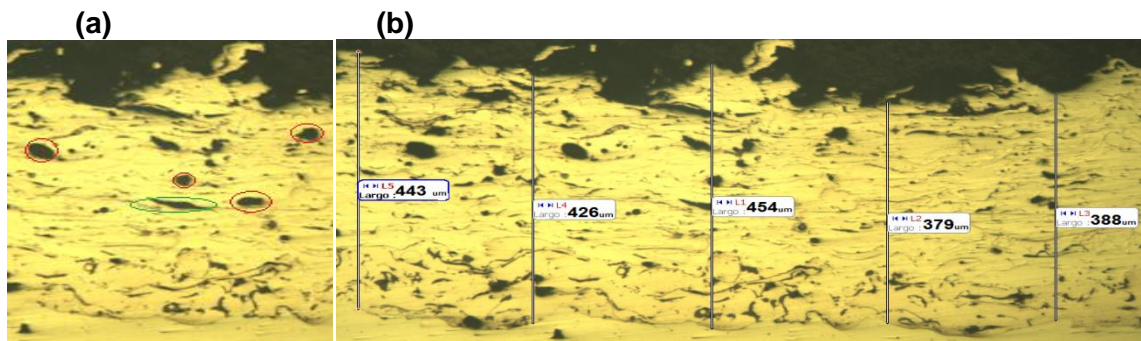


Figura 29. Muestra M8 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5x. (b). Condiciones de espesor a 10x.

La figura 30 muestra como la capa simultanea se comporta de forma homogénea desapareciendo en la gran mayoría los óxidos en la interface de los materiales así como con el material base debido a la buena fluidez que tuvieron los materiales con los parámetros usados ya que los rangos en los que se encuentran favorecen la afinidad las propiedades de los dos materiales disminuyendo al máximo la defectología propia de cada uno de ellos como lo describen algunos autores<sup>[31]</sup>.

El comportamiento de los espesores esta registrado en la tabla 11.

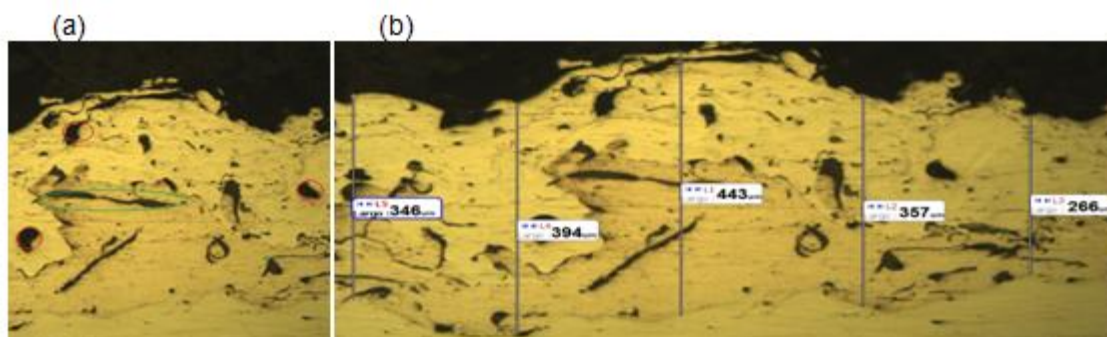


Figura 30. Muestra M9 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5x. (b). Condiciones de espesor a 10x.

Tabla 13. Valor de espesores de los depósitos. Fuente: Autor del proyecto.

MUESTRA	ESPEJOR ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma$ (Varianza)	$\bar{x}$ (Promedio)
M1	242 229 248 298 244	26.57442	252.2
M2	256 250 279 216 273	24.73257	254.8
M3	155 147 204 140 148	25.82053	158.8
M4	475 459 476 479 505	16.58915	478.8
M5	377 352 384 352 377	15.24139	368.4
M6	326 323 281 281 322	23.41581	306.6
M7	405 376 420 432 388	22.80789	404.2
M8	443 426 454 379 388	33.18885	418
M9	346 394 443 357 266	65.34294	361.2



En la tabla 13 se muestra la medición de espesores de las muestras depositadas con 140MXC-530AS, en las cuales los promedios de tamaño en las secciones transversales de las muestras oscilan entre los 158,8 $\mu$ m y 478,8 $\mu$ m.

### 5.1.2. 140MXC-560AS

En las figuras 31, 32 y 34 hay una constante que acompaña a estas tres muestras y son los poros de gran diámetro en la zona media del recubrimiento este comportamiento se puede atribuir en parte a que los poros son característicos del recubrimiento 560AS y a la habilidad propia del operario ya que los parámetros de operación en toda esta corrida se manejaron en rangos muy pequeños entre las nueve muestras y solo las tres mencionadas presentan esta condición, así como espesores que oscilan entre los 230 $\mu$ m y 250 $\mu$ m<sup>[22]</sup>. También se puede observar cómo se fusionan los materiales de mejor forma que el recubrimiento 140MXC-530AS ya que aquí las interfaces entre los splats desaparecen casi que por completo dando lugar a un recubrimiento más compacto el cual le brindara mejor protección al material base que es el objetivo como tal del proceso. También logra verse una característica conocida como crecimiento columnar en la figura 30 esta se identifica por el gran espesor de las zonas oscuras que se observan hacia la base del recubrimiento algunos autores atribuyen este comportamiento al buen flujo de calor que se logra por la aplicación perpendicular del depósito por la técnica de arco.<sup>[32]</sup>

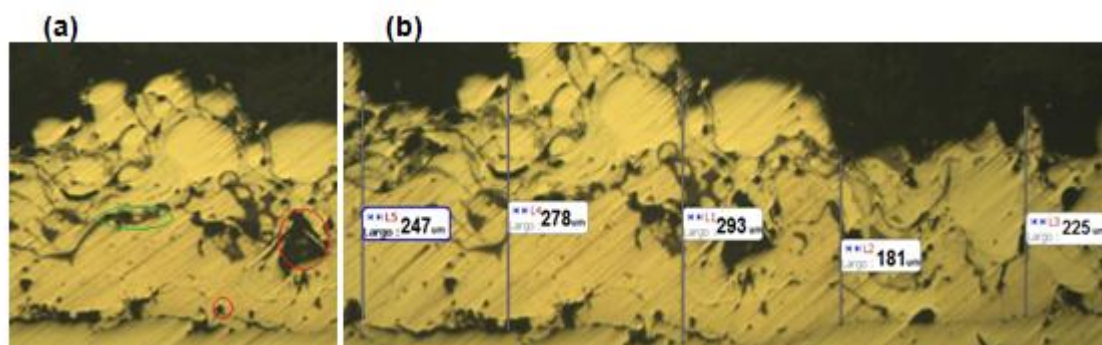


Figura 31. Muestra M1 Metalografía a 10x. (a). Comportamiento del recubrimiento. (b). Condiciones de espesor.

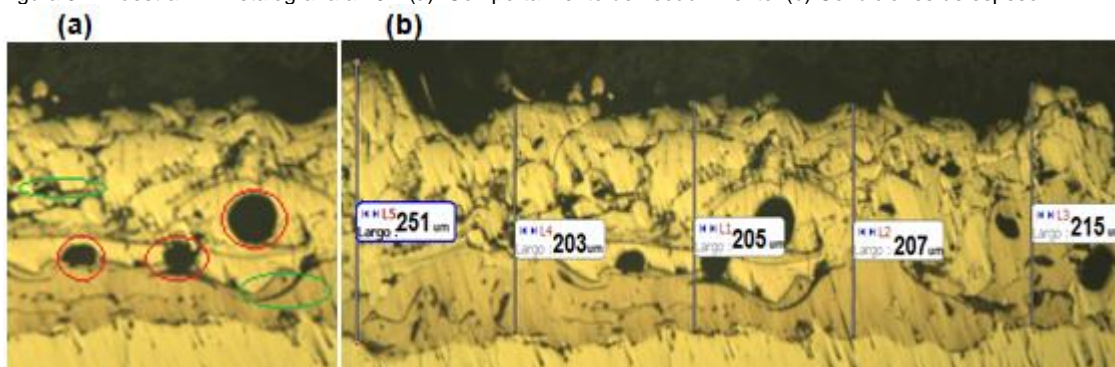


Figura 32. Muestra M2 Metalografía a 10x. (a). Comportamiento del recubrimiento. (b). Condiciones de espesor.

La muestra de la figura 33 se muestra como al tener en los mismo rangos la presión primaria y secundaria beneficia en gran medida el aumento de espesor del recubrimiento

pero al mismo tiempo aumenta en la misma medida los óxidos y vacío es la parte interna del depósito aunque los demás parámetro estén dentro de los rangos recomendados por el fabricante, aunque si brinda gracias a estos una mejor uniformidad entre los materiales y buen anclaje con el sustrato, caso contrario en la figura 34 ya que se puede ver una gran homogenización en la parte interna de recubrimiento el espesor no es el optimo y las inclusiones se encuentran acumuladas hacia la superficie de l depósito.

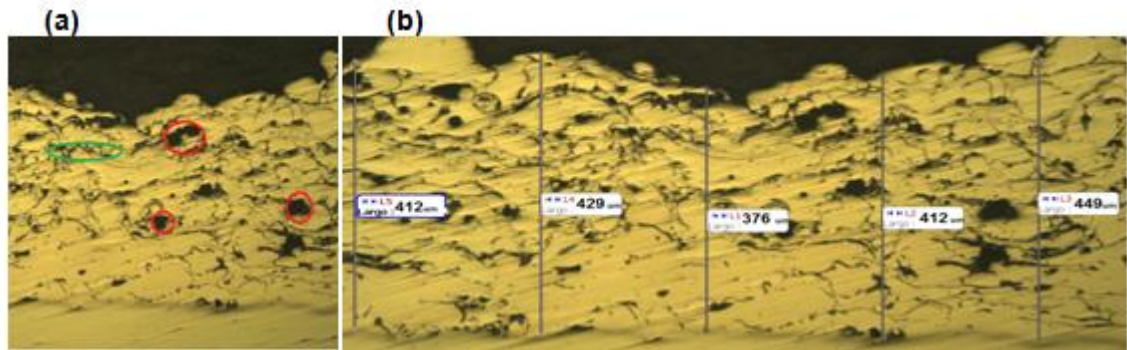


Figura 33. Muestra M3 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5x. (b). Condiciones de espesor a 10x.

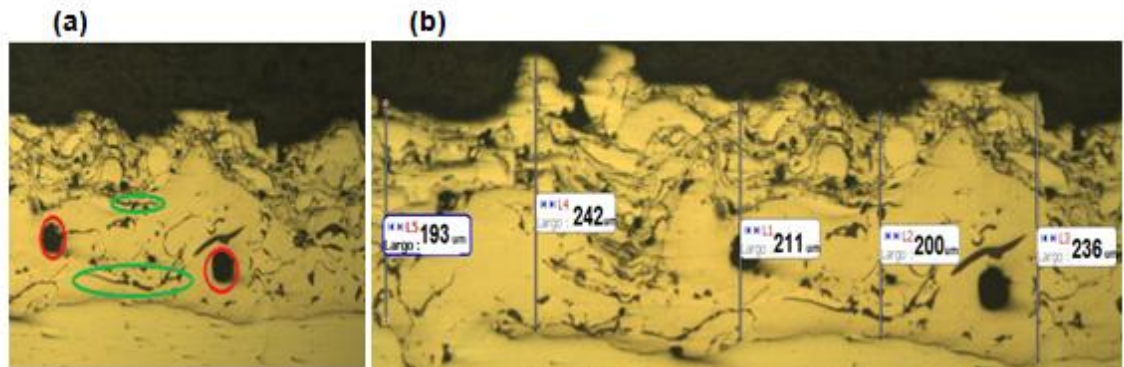


Figura 34. Muestra M4 Metalografía a 10x. (a). Comportamiento del recubrimiento. (b). Condiciones de espesor.

Debido a los bajos amperajes y la sobrepresión se puede observar en las figuras 35 y 36 correspondientes a las muestras M5 y M6 una cadena de poros conectados desde la superficie del depósito hacia el material base de nuevo se ve la homogeneidad del depósito al no ser visibles las interfaces entre los materiales pero las conexiones de los vacíos vuelven susceptible al sustrato a ataques corrosivos.

Otras de las posibles causas de la geometría de los vacíos es el enfriamiento súbito entre las cada unas de las pasadas del depósito ya que se pudieron haber generado contracciones en los splats, al llegar el choque de las nuevas partículas se crearon splats de gran área que no llenaron por completo estos espacios de la capa anterior.



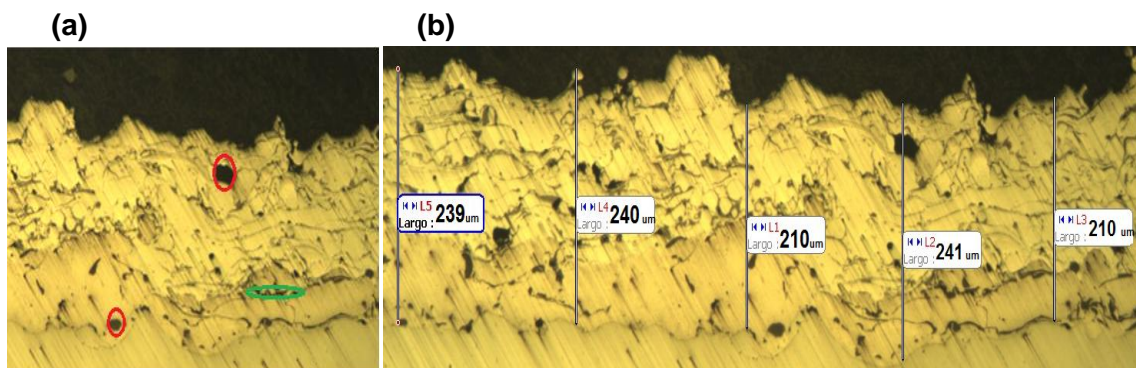


Figura 35. Muestra M5 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5x. (b). Condiciones de espesor a 10x.

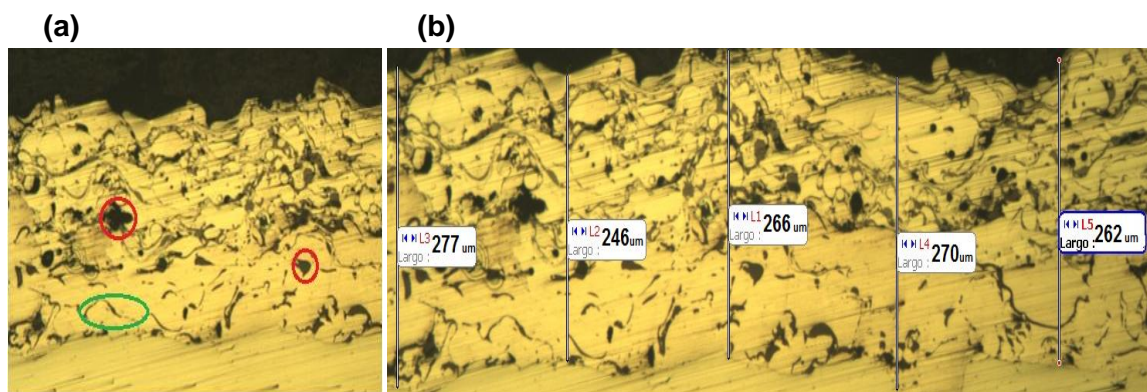


Figura 36. Muestra M6 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5x. (b). Condiciones de espesor a 10x.

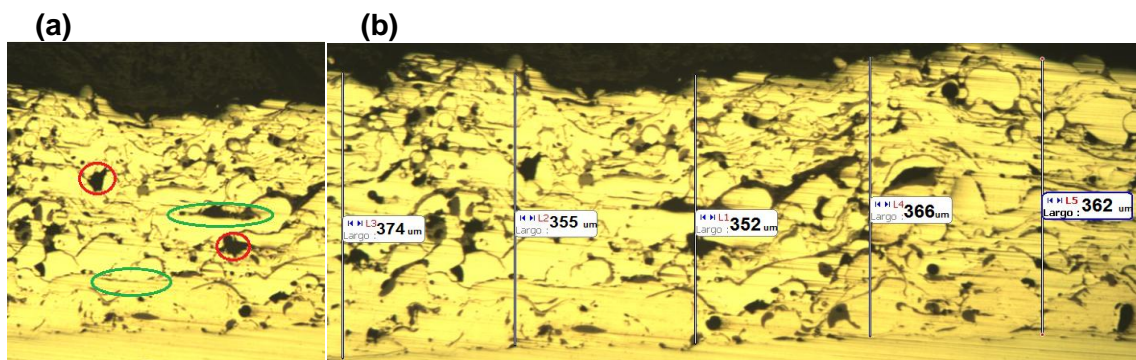


Figura 37. Muestra M7 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5x. (b). Condiciones de espesor a 10x.

En la muestra de la figura 38 el comportamiento del depósito es completamente distinto al de las demás puesto que solo se observa la aparición de un vacío de gran tamaño y porosidad aislada, sumado al bajo espesor que presenta esto se debe posiblemente a la técnica de aplicación del recubrimiento por parte del operario ya que los parámetros usados en el equipo no son tan distintos de los usados en otras muestras.

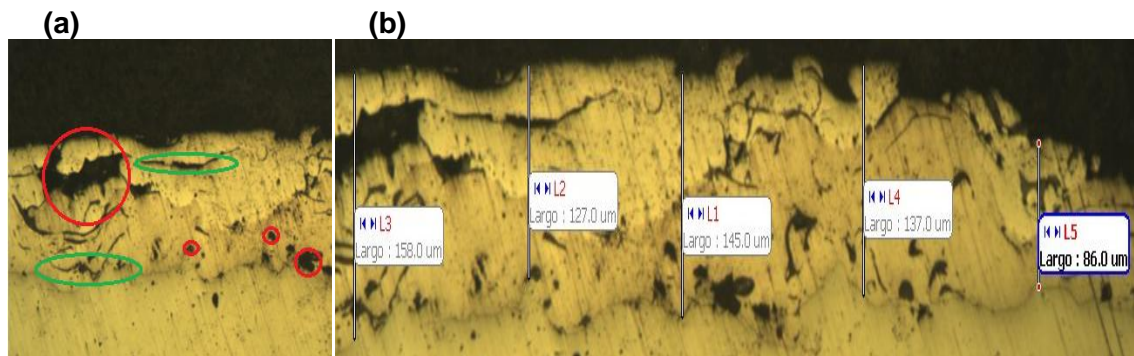


Figura 38. Muestra M8 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5x. (b). Condiciones de espesor a 10x.

Para el recubrimiento de la figura 39 los parámetros parecieron beneficiar al material 560AS ya que se encuentra en la mayoría de la muestra y con un mayor espesor, este se identifica por la zonas de color oscuro y donde se encuentran mayor numero de porosidades defecto típico en este material de depósito, las pocas zonas claras en la muestra son donde se encuentra el 140 MXC aislado en algunos puntos.

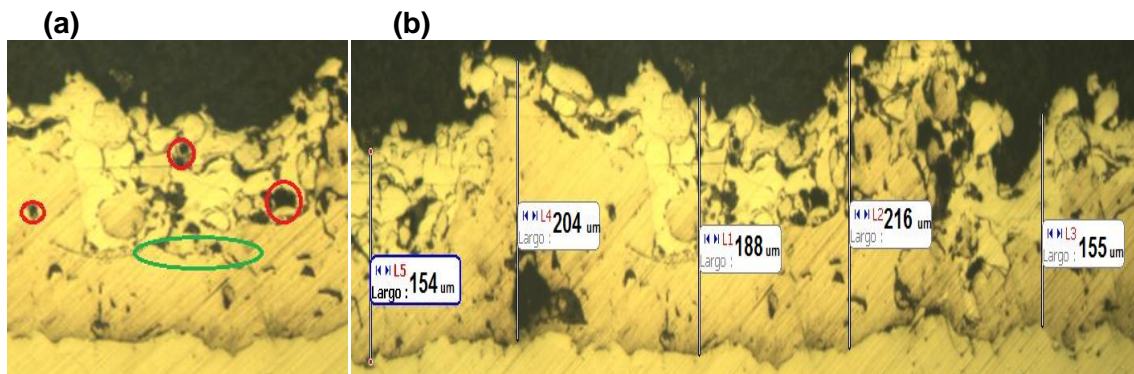


Figura 39. Muestra M9 Metalografía. (a). Comportamiento del recubrimiento a 5x. (b). Condiciones de espesor a 10x.

Tabla 14. Valor de espesores de los depósitos. Fuente: Autor del proyecto.

MUESTRA	ESPESOR ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma$ (Varianza)	$\bar{x}$ (Promedio)
M1	247 278 293 181 225	44.42072	244.8
M2	251 203 205 207 215	19.97999	216.2
M3	412 429 376 412 449	26.87564	415.6
M4	193 242 211 200 230	20.48658	215.2
M5	239 240 210 241 210	16.44688	228
M6	277 246 266 270 262	11.58447	264.2
M7	374 355 352 366 362	8.78635	361.8
M8	158 127 145 137 86	27.3916	130.6
M9	154 204 188 216 155	28.1922	183.4

En la tabla 14 se muestra la medición de espesores de las muestras depositadas con 140MXC-530AS, en las cuales los promedios de tamaño en las secciones transversales de las muestras oscilan entre los 130,6 $\mu\text{m}$  y 415,6 $\mu\text{m}$ .

La variación en la altura de la muestra M8 que se muestra en la tabla 14 tiene un comportamiento atípico como se observó en el análisis metalográfico, su condición extremadamente baja de espesor posiblemente se deba a la forma de aplicación por parte del operario ya que los parámetros de aspersión usados



son similares a las de otras muestras de este depósito sin afectar de la misma manera la calidad del espesor.

## 5.2. Microdureza.

Para las pruebas de Microdureza las muestras fueron penetradas con un indentador Vickers sobre la sección transversal del recubrimiento con cargas variadas para determinar cuál de estas cargas era la que menor variación en las mediciones arrojaba y que no generara agrietamiento alrededor de la huella.

Se realizaron tres indentaciones en cada una de las muestras en la superficie del recubrimiento, en la zona media y en la interface del depósito con el material base como se muestra en la figura 40, con el fin de evaluar el comportamiento de la dureza del depósito a lo largo del espesor.

Se uso una carga de 200g ya que esta carga fue la que menos variación mostro en la prueba preliminar y por un lapso de tiempo de 40 segundos de tal manera que la huella que se generara fuera de tamaño suficiente para no confundirse con alguna porosidad <sup>[33]</sup>

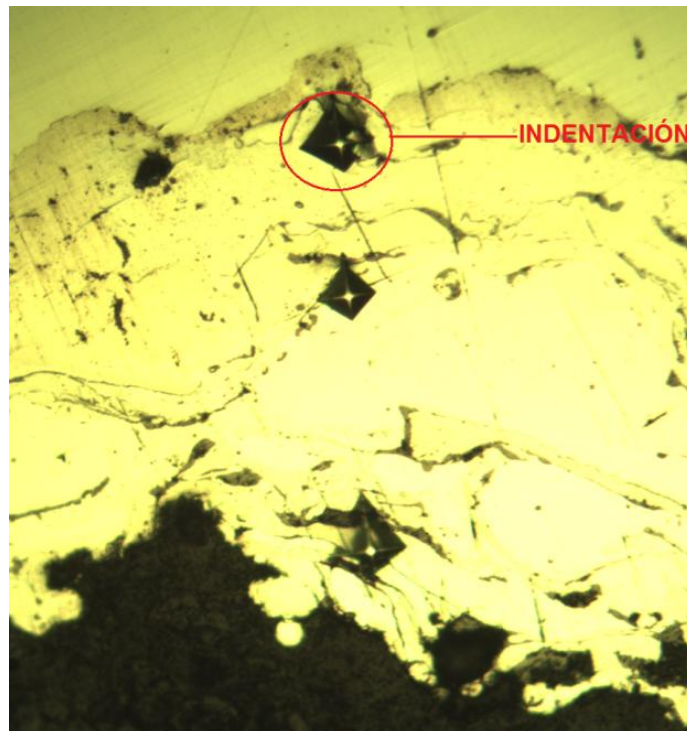


Figura 40. Huella Microdureza. Fuente: Autor.

Los resultados obtenidos en la prueba de Microdureza se encuentran registrados en la tabla 15.

Tabla 15. Ensayo de Microdureza con carga de 300g.

Numero de Muestra	140 MXC-530AS	140MXC-560AS
M1	Superficie: 882,5 HV Zona Media: 766,3 HV Base/deposito: 104,8 HV	Superficie: 154,5 HV Zona Media: 311,6 HV Base/deposito: 93,44 HV
M2	Superficie: 231,8 HV Zona Media: 110,2 HV Base/deposito: 104,8 HV	Superficie: 220,6 HV Zona Media: 237,7 HV Base/deposito: 215,3HV
M3	Superficie: 200,6 HV Zona Media: 129,6HV Base/deposito: 164,4 HV	Superficie: 882,5 HV Zona Media: 243,8 HV Base/deposito: 175,3 HV
M4	Superficie: 278,4 HV Zona Media: 161,0 HV Base/deposito: 129,6 HV	Superficie: 426,2 HV Zona Media: 882,5 HV Base/deposito: 154,5 HV
M5	Superficie: 548,6 HV Zona Media: 215,3 HV Base/deposito: 120,4HV	Superficie: 142,6 HV Zona Media: 99,67 HV Base/deposito: 122,6HV
M6	Superficie: 927,2 HV Zona Media: 435,0 HV Base/deposito: 200,6 HV	Superficie: 385,9 HV Zona Media: 490,4 HV Base/deposito: 68, 65HV
M7	Superficie: 196,0 HV Zona Media: 701,1 HV Base/deposito: 157,7 HV	Superficie: 528,1 HV Zona Media: 294,3 HV Base/deposito: 151,4HV
M8	Superficie: 286,2 HV Zona Media: 96,48 HV Base/deposito: 80,44 HV	Superficie: 570,4 HV Zona Media: 183,2 HV Base/deposito: 142,6HV
M9	Superficie: 200,6 HV Zona Media: 167,9 HV Base/deposito: 151,4 HV	Superficie: 161,0 HV Zona Media: 302,8 HV Base/deposito: 142,6HV

Se puede observar que en las mediciones de las muestras de combinación 140MXC-530AS se registra un aumento en los valores de dureza hacia la superficie del recubrimiento

Por otra parte en las muestras de combinación 140MXC-560AS se observa el aumento de dureza en la zona media de recubrimiento posiblemente se deba a que en esta zona se presenta una homogenización total de los materiales casi que generando una pseudo aleación como algunos autores lo llaman <sup>[31]</sup>, esto sumado a la composición química del material 560AS de naturaleza inoxidable brindarían este comportamiento, para los recubrimientos 140MXC-530AS se presento el caso contrario ya que la zona media no es la de mayor dureza debido a la gran cantidad de inclusiones entre los splast generados por la baja fluidez de los materiales durante el depósito.

Para el caso de la interface recubrimiento/sustrato la baja dureza es una contante en las muestras de las dos combinaciones debido a la gran cantidad de defectos que se presentan entre la primera capa de depósito y el material base así como el amento de la condición de agrietamiento por la contracción del recubrimiento en la etapa de solidificación.

### 5.3. Caracterización de partículas semifundidas.

Para la caracterización de tamaño de las partículas semifundidas se realizo un análisis de imágenes mediante en software Gwyddion de la morfología de los recubrimientos obtenidas por la técnica SEM. Realizando un contraste de los pixeles de las geometrías seleccionadas en el programa de análisis.

El procedimiento para la medición de las partículas se realizo mediante la división de las probetas en cuatro sectores figura 41, a los cuales el software le realizo una barrido con el fin de identificar las geometrías de las partículas, medirlas y por medio de un tratamiento estadístico de datos y una auto correlación en 2 dimensiones internas del programa arroja un promedio por zonas del tamaño de partículas semifundidas representado en una serie de perfiles como los que se observan en la figura 42 y 43.

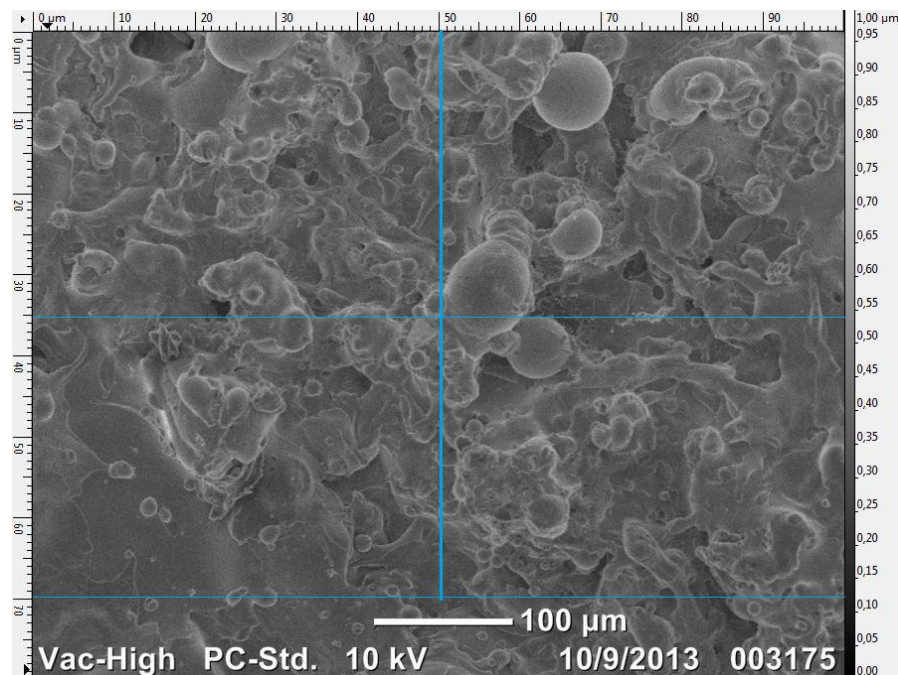


Figura 41. División de la muestra. Fuente: Autor del proyecto

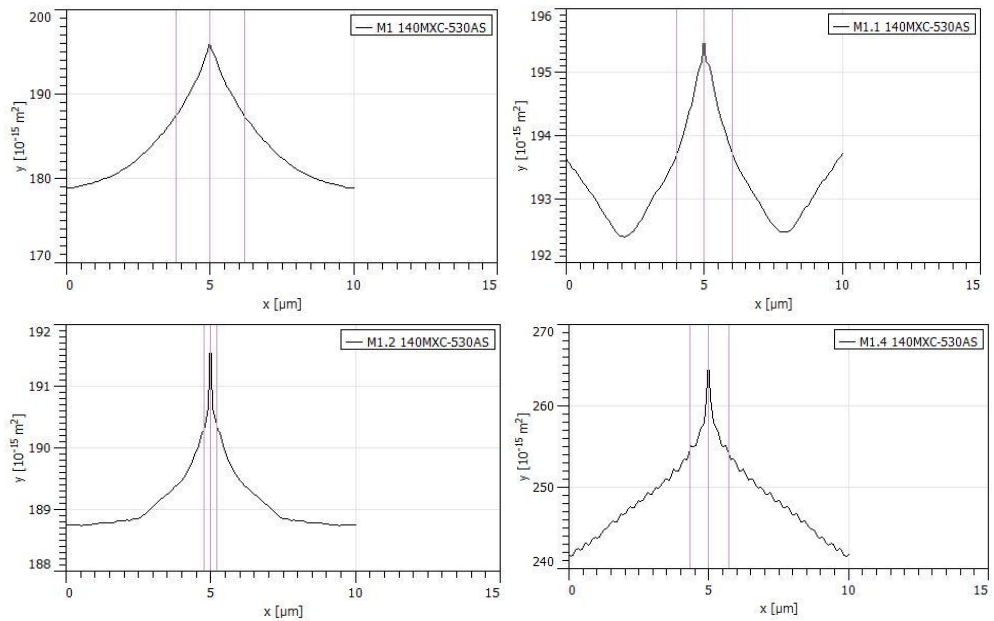


Figura 42. Perfiles de medida de partículas semifundidas. Fuentes: Autor del Proyecto

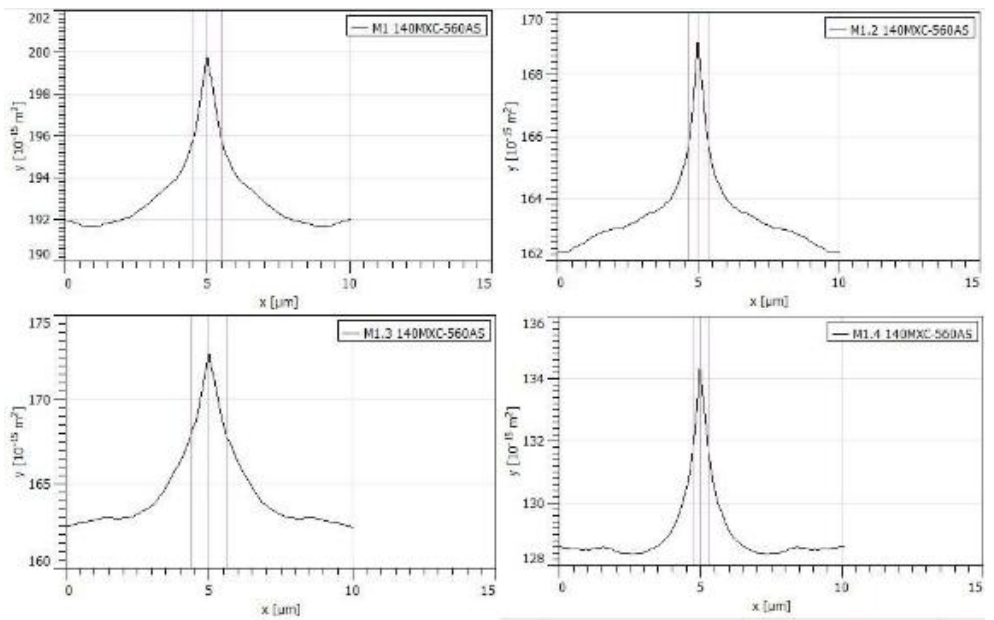


Figura 43. Perfiles de medida de partículas semifundidas. Fuentes: Autor del Proyecto

Los datos obtenidos mediante el programa de análisis de imágenes se registraron en las tablas 16 y 17.

Tabla 16. Tamaño promedio de partícula recubrimiento 140MXC - 530AS. Fuente: Autor del Proyecto.

Muestra	Tamaño partícula ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma$	$\bar{x}$
<b>M1</b>	Zona 1: 2,38 Zona 2: 2,02 Zona 3: 0,44 Zona 4: 1,39	0.84996	1.5575
<b>M2</b>	Zona 1: 1,64 Zona 2: 1,76 Zona 3: 1,017 Zona 4: 1,154	0.36249	1.39275
<b>M3</b>	Zona 1: 0,685 Zona 2: 0,81 Zona 3: 0,77 Zona 4: 1,17	0.21395	0.85875
<b>M4</b>	Zona 1: 1,10 Zona 2: 0.92 Zona 3: 1,76 Zona 4: 0,66	0.46947	1.11
<b>M5</b>	Zona 1: 0,62 Zona 2: 0,73 Zona 3: 0,70 Zona 4: 1,14	0.23301	0.7975
<b>M6</b>	Zona 1: 2,02 Zona 2: 0,88 Zona 3: 1,06 Zona 4: 1,48	0.50675	1.36
<b>M7</b>	Zona 1: 3,23 Zona 2: 3,37 Zona 3: 2,75 Zona 4: 1,72	0.7471	2.7675
<b>M8</b>	Zona 1: 1,06 Zona 2: 1,06 Zona 3: 1,39 Zona 4: 1,30	0.1686	1.2025
<b>M9</b>	Zona 1: 0,62 Zona 2: 1,21 Zona 3: 0,55 Zona 4: 3,01	1.14718	1.3475

En la tabla 16 se muestra la medición de las partículas semifundidas arrojada por el análisis de imágenes en las muestras depositadas por 140MXC-530AS en las cuales los promedios de tamaño en las superficies de las muestras oscilan entre los 0,86  $\mu\text{m}$  y 2,78  $\mu\text{m}$ .

Tabla 17. Tamaño promedio de partícula recubrimiento 140MXC - 560AS. Fuente: Autor del Proyecto.

Muestra	Tamaño partícula ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma$	$\bar{x}$
<b>M1</b>	Zona 1: 0,99 Zona 2: 0,70 Zona 3: 1,25 Zona 4: 0,55	0.31095	0.8725
<b>M2</b>	Zona 1: 1,36 Zona 2: 0,92 Zona 3: 1,72 Zona 4: 0,77	0.43169	1.1925
<b>M3</b>	Zona 1: 1,59 Zona 2: 1,36 Zona 3: 1,32 Zona 4: 1,06	0.21716	1.3325
<b>M4</b>	Zona 1: 0,59 Zona 2: 0,99 Zona 3: 1,37 Zona 4: 0,62	0.36664	0.8925
<b>M5</b>	Zona 1: 3,48 Zona 2: 0,95 Zona 3: 0,30 Zona 4: 0,77	1.42984	1.375
<b>M6</b>	Zona 1: 0,56 Zona 2: 0,37 Zona 3: 0,46 Zona 4: 1,58	0.5637	0.7425
<b>M7</b>	Zona 1: 1,28 Zona 2: 1,10 Zona 3: 0,59 Zona 4: 0,62	0.34587	0.8975
<b>M8</b>	Zona 1: 2,05 Zona 2: 2,18 Zona 3: 1,98 Zona 4: 0,84	0.62056	1.7625
<b>M9</b>	Zona 1: 0,83 Zona 2: 1,43 Zona 3: 0,42 Zona 4: 1,39	0.48342	1.0175

En la tabla 16 se muestra la medición de las partículas semifundidas arrojada por el análisis de imágenes en las muestras depositadas por 140MXC-560AS en las cuales los promedios de tamaño en las superficies de las muestras oscilan entre los 0,79  $\mu\text{m}$  y 1,76  $\mu\text{m}$ .



Se ve una reducción notable en el tamaño de partículas semifundidas de los depósitos de 140MXC-560AS lo cual se podrá corroborar con la observación de la morfología de los recubrimientos por la técnica de SEM.

#### 5.4. Microscopia Electrónica de Barrido.

##### 5.4.1. 140MXC – 530AS

Para el análisis morfológico de las muestras se realizó la toma de micrografías al área superior de recubrimiento con el fin de identificar más fácilmente la defectología que se presenta en la superficie del depósito, las imágenes van desde 200 $\mu\text{m}$  hasta 10 $\mu\text{m}$  y se señala los vacíos y poros de color amarillo, las partículas semifundidas y las grietas con azul.

En figura 44(a) se observan vacíos de gran tamaño y partículas semifundidas de tamaño medio comunes en el material 530AS con formación de splats de tamaño regular lo que explica la baja condición de poros en la superficie esto debido a la buena presión aplicada en los parámetros por lo cual generó un llenado más uniforme de los vacíos entre capas, en la imagen (b) se muestra la formación de micro grietas por la contracción en la solidificación de los splats.

Para la figura 45 se nota un aumento en las partículas semifundidas de menor tamaño pero mayor cantidad de porosidad como se muestra en imagen (b) por el bajo amperaje usado en esta pasada lo que generó una baja fusión de los materiales causando un pobre impacto de las partículas contra el material base y por ende bajo llenado de los espacios entre splats.

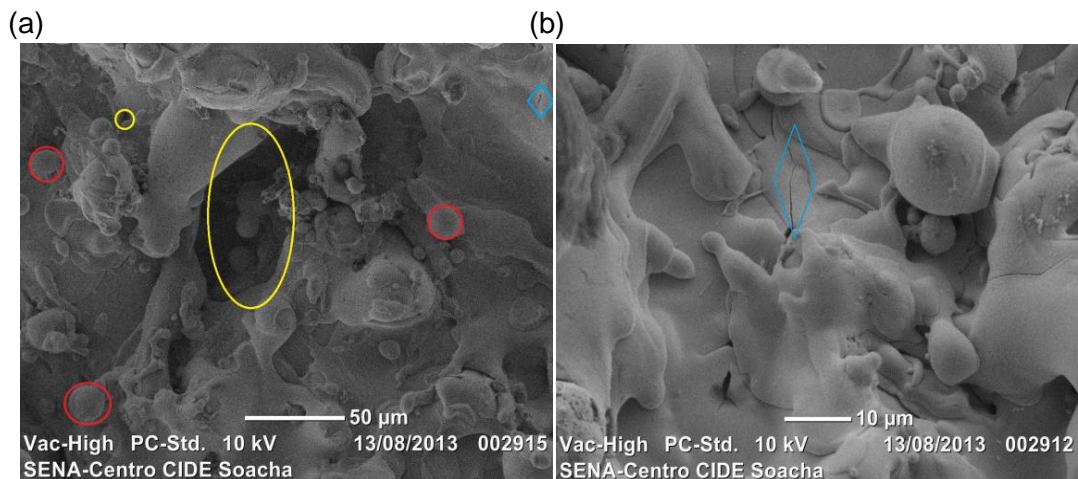
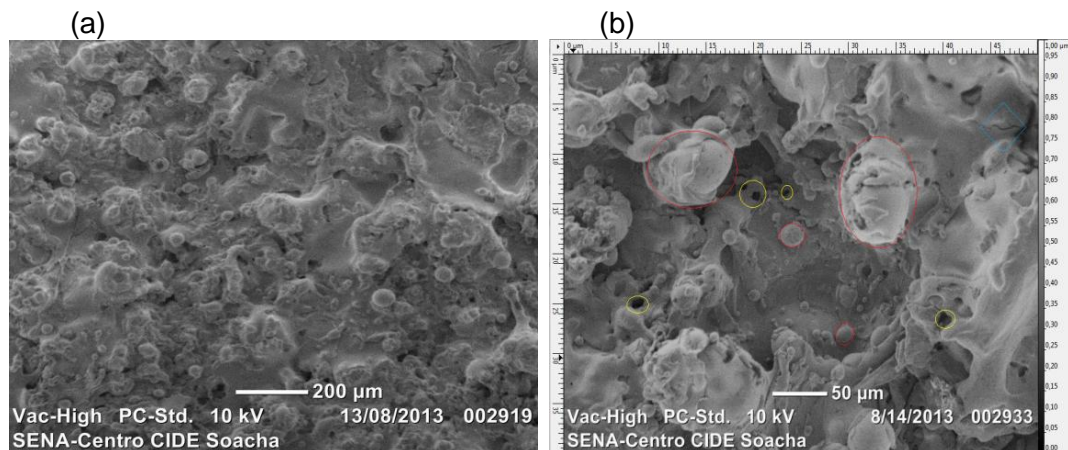


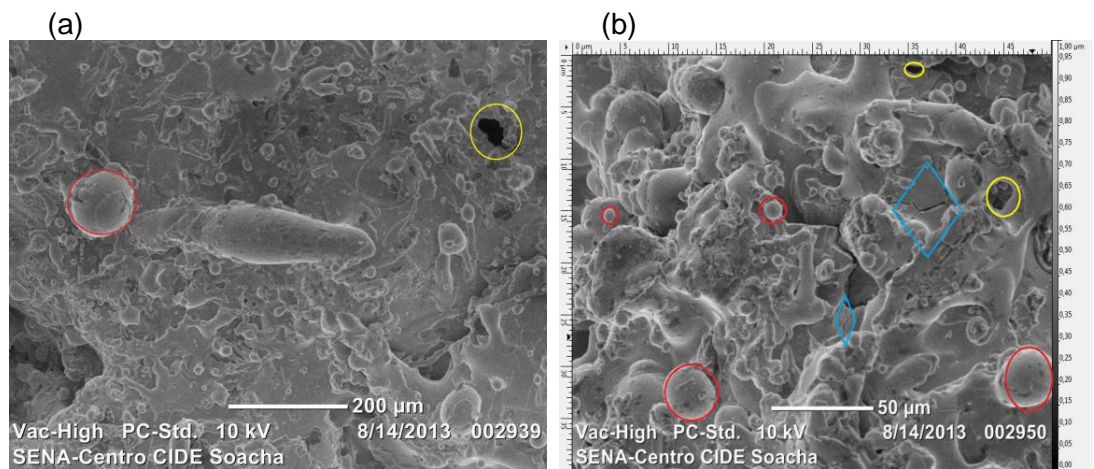
Figura 44: Micrografía SEM M1. (a) Vista General, (b) Detalle.



**Figura 45: Micrografía SEM M2. (a) Vista General, (b) Detalle**

Los parámetros usados para las muestras de las figuras 46 y 47 varían poco y favorecen el corto tiempo de permanencia de las partículas, por esta razón se ve un aumento en la formación de splats así como de partículas disgregadas, estas son partículas que al impactar se separaron en partículas semifundidas de menor tamaño debido a un aumento significativo en la presión de aire secundaria del equipo. <sup>[34]</sup>, por esta misma razón se ven la aparición de poros aislados en la superficie.

Por lo que se observa en la figura 47 un valor alto en el parámetro de presión secundaria de aire es determinante en la formación correcta de splats y mayor uniformidad en la gran mayoría de la superficie del recubrimiento lo cual es señal de alta adhesión entre las capas, por otro lado la baja corriente en el equipo muestra la aglomeración de partículas pequeñas lo que da lugar a irregularidades en la superficie y aumento en la rugosidad del recubrimiento <sup>[35]</sup>.



**Figura 46: Micrografía SEM M3. (a) Vista General, (b) Detalle**



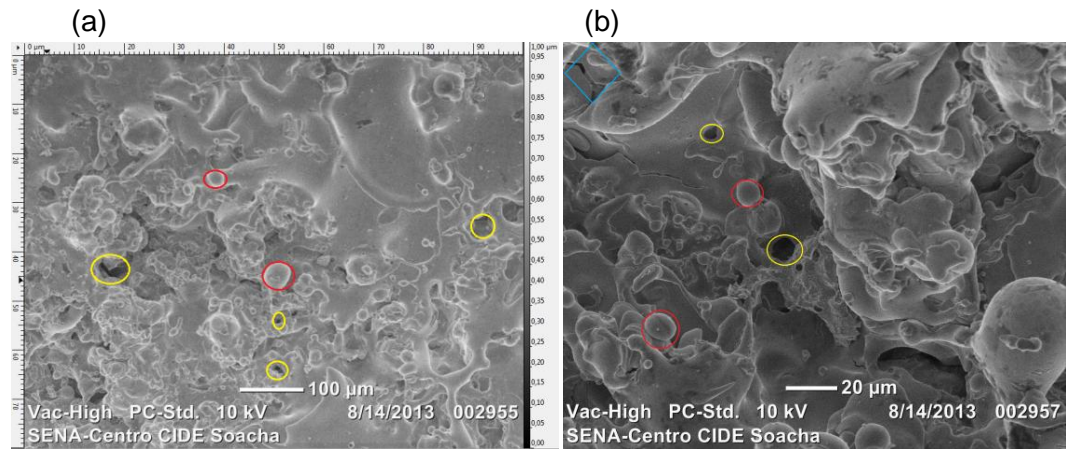


Figura 47: Micrografía SEM M4. (a) Vista General, (b) Detalle

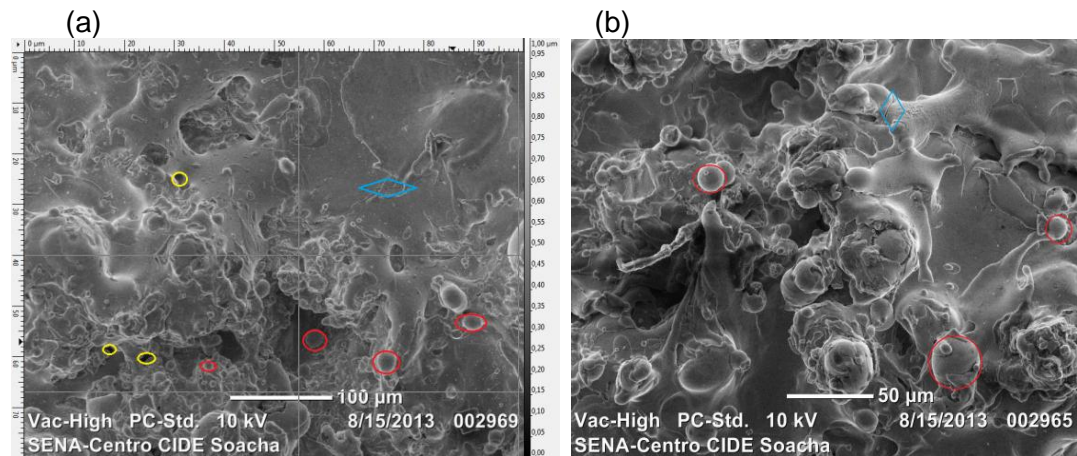
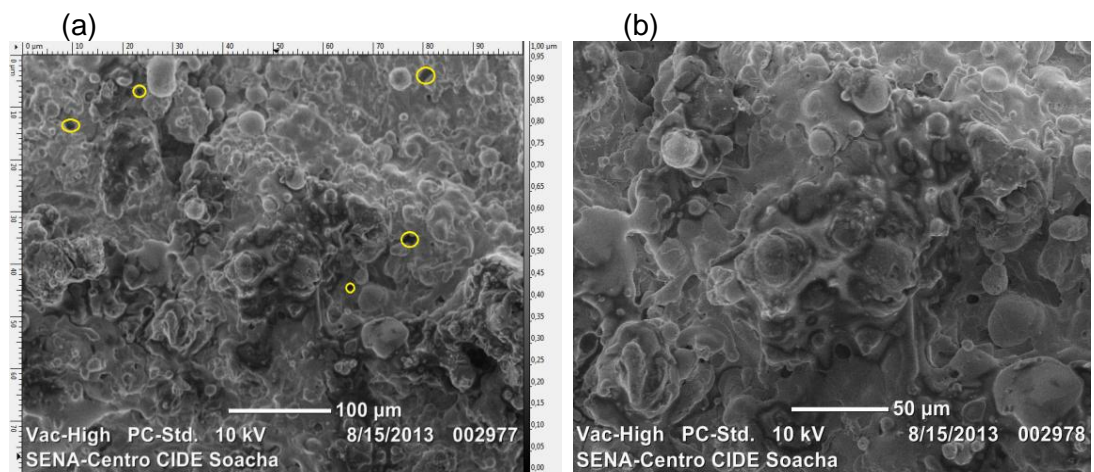


Figura 48: Micrografía SEM M5. (a) Vista General, (b) Detalle

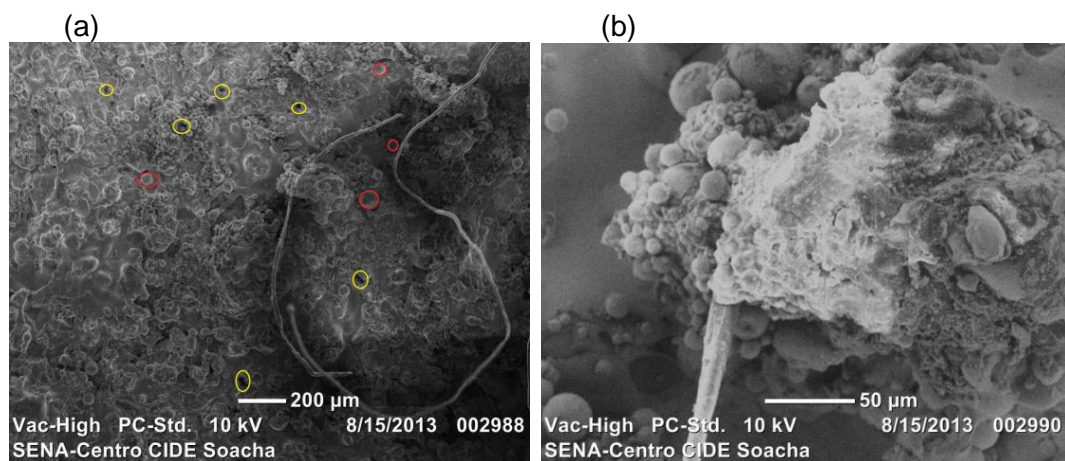
En La figura 49 se observa la aparición de poros concentrado en las formaciones de splats mas no en las zonas de partículas semifundidas esto ocurrió posiblemente por la aparición de aire en el interior de las partículas en el momento de fundirse, al impactar estas partículas contra la muestra los espacios ocupados en el aire generaron los poros en los splat, por otra lado se ve la aglomeración de partículas semifundidas de tonalidad oscura, en investigaciones como la de Carvalho <sup>[36]</sup> sugieren que en el momento en el que las partículas son expulsadas sufren una descomposición pero en el momento del impacto contra el sustrato pasan por un proceso de recristalización dando lugar a formaciones del tipo que se presentan en la muestra M6, figura 49 (b).



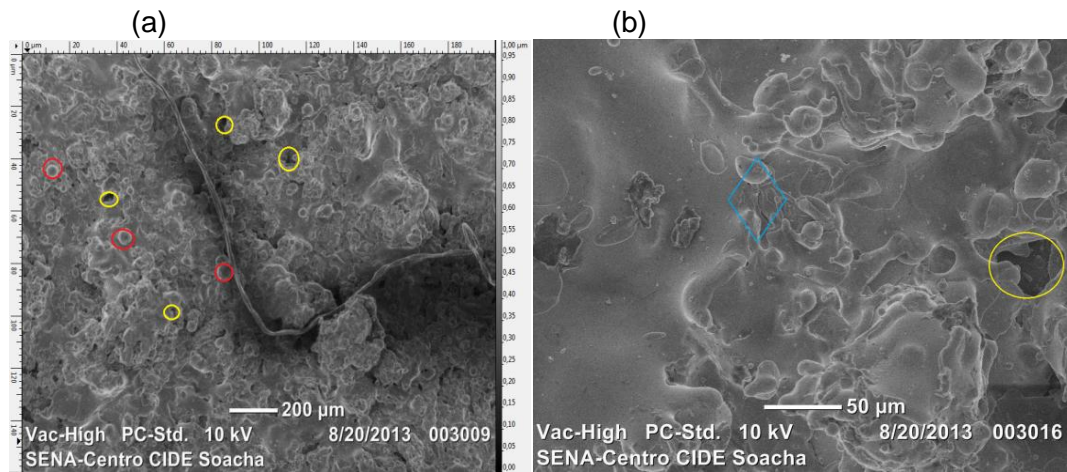
**Figura 49: Micrografía SEM M6. (a) Vista General, (b) Detalle**

En las muestras M7 Y M8 de las figuras 50 y 51 respectivamente se observa algo inusual y es la parición de alambres sin fundir en un pequeño sector de la superficie del recubrimiento así como acumulaciones de partículas semifundidas adheridas a estos alambres que se pueden ver en detalle en la figura 50 (a), la superficie restante de la muestra presentan el comportamiento esperado en los materiales usados con un leve aumento de porosidad que se puede observar en la figura 48 (a).

La aparición de los trozos de alambre pudo ser causado por el alto potencial usado en el depósito de las dos muestras, se ha encontrado en investigaciones que el aumento de voltaje en el proceso genera la producción de partículas de mayor tamaño al realizar un arco inadecuado entre los alambres, al ser inestable el arco se secciono el alambre en vez de realizar la fusión del material <sup>[29]</sup>.

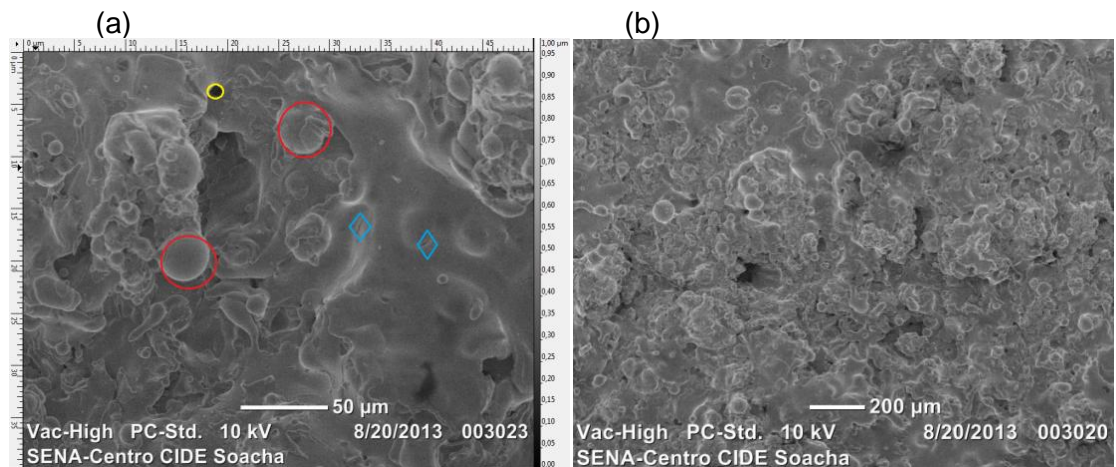


**Figura 50: Micrografía SEM M7. (a) Vista General, (b) Detalle**



**Figura 51: Micrografía SEM M8. (a) Vista General, (b) Detalle**

El comportamiento de las muestra M9, figura 52, corresponde a lo que se espera de un recubrimiento con esta combinación de materiales, porosidades dentro del rango normal y comunes del 530 AS así como la formación de partículas semifundidas Propias del 140 MXC con buena formación de splats como se observa en la figura (a) con algunas micro grietas formadas en el proceso de solidificación del material y que solo son visibles a altos aumentos en general presenta una superficie homogénea típica del proceso de termo aspersión por arco.<sup>[35]</sup>



**Figura 52: Micrografía SEM M9. (a) Vista General, (b) Detalle**



#### 5.4.2. 140MXC – 560AS

En las figuras 53,54 y 55 se observa un comportamiento similar en las tres muestras, con presencia de partículas semifundidas de gran tamaño (Tabla 14) debido a los altos voltajes usados, así como la aparición de micro grietas en las formaciones de splats y porosidades recubrimiento posiblemente por los parámetros de depósito ya que los amperajes usados están dentro de los rangos para el material 560AS mas no para el 140MXC por esta razón no se genero la fluidez necesaria para llenar los espacios generados por el 140MXC.<sup>[31]</sup>

Al ver las imágenes en detalles también se puede observar que las porosidades presentes tienden a ser profundas ya que las partículas de gran tamaño ya nombradas se superponen entre ellas, creando poros conectados como canales hacia el interior del recubrimiento lo cual se puede corroborar con las imágenes obtenidas en la sección transversal por microscopía óptica (Figuras 31-33).

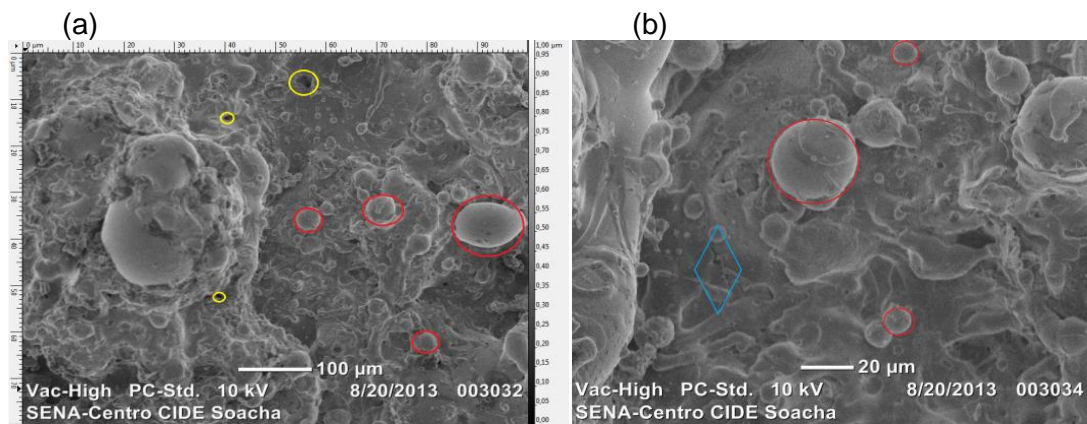


Figura 53: Micrografía SEM M1. (a) Vista General, (b) Detalle

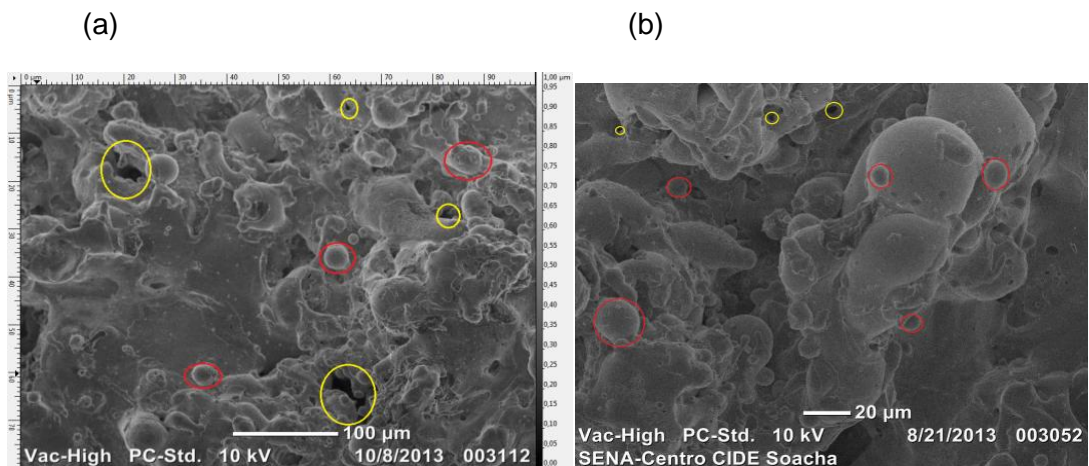
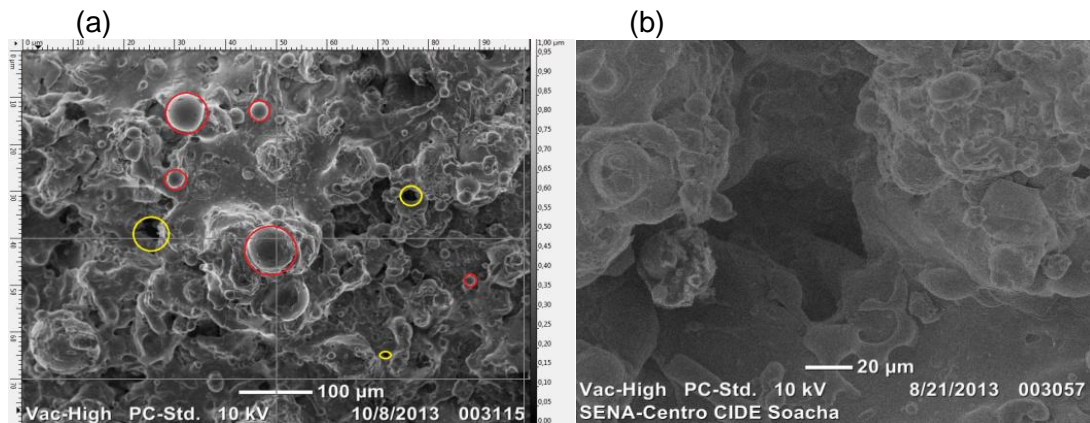


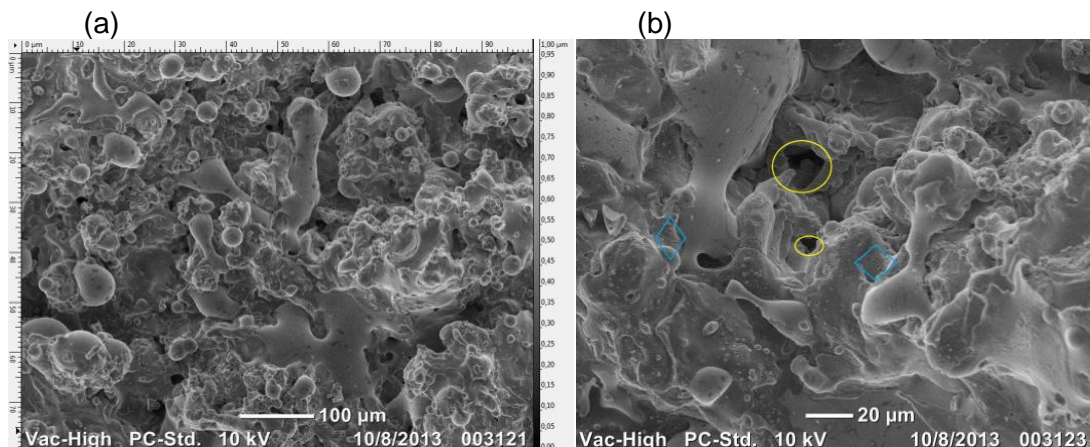
Figura 54: Micrografía SEM M2. (a) Vista General, (b) Detalle



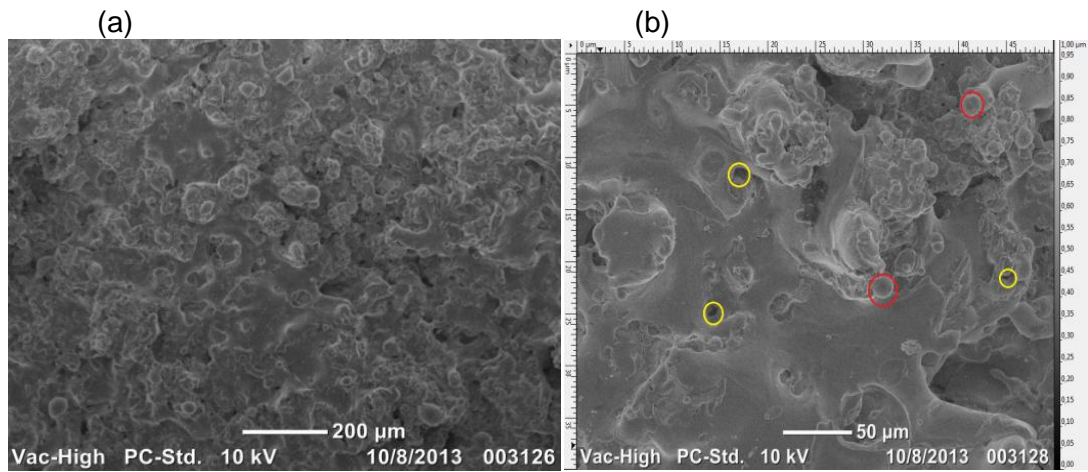
**Figura 55: Micrografía SEM M3. (a) Vista General, (b) Detalle**

Se observa en la figura 56 una combinación entre la cantidad de splats y partículas semifundidas en la muestra con aparición de poros en las zonas de acumulación de partículas y grietas en los splats este comportamiento se logra por una mejor combinación entre los parámetros de aspersión demostrando una reducción en la aparición de la defectología típica de cada material.

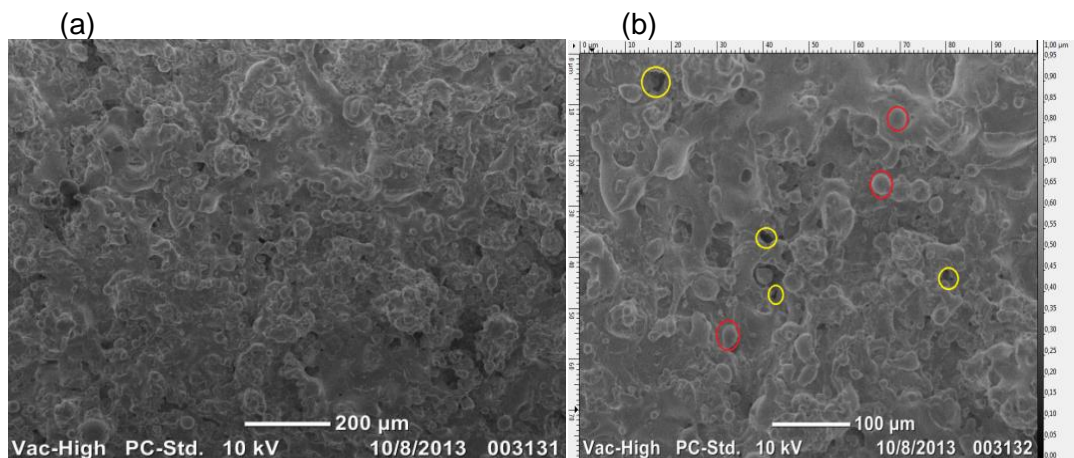
Por otra parte en la figura 57 se ve una mejoría en las condiciones de porosidad y agrietamiento, así como la aparición de mayor cantidad de splats, aunque el amperaje usado para esta muestra fue mucho menor a la de la anterior se puede suponer que el aumento de los splats fue gracias a las presiones de aire, esto quiere decir que estas formaciones fueron causadas no por buena fusión sino por una alta energía cinética alcanzada por las partículas y por ende un impacto de mayor fuerza contra el sustrato y sin la aparición de grietas por contracción al tener una baja temperatura en el proceso.



**Figura 56: Micrografía SEM M4. (a) Vista General, (b) Detalle**



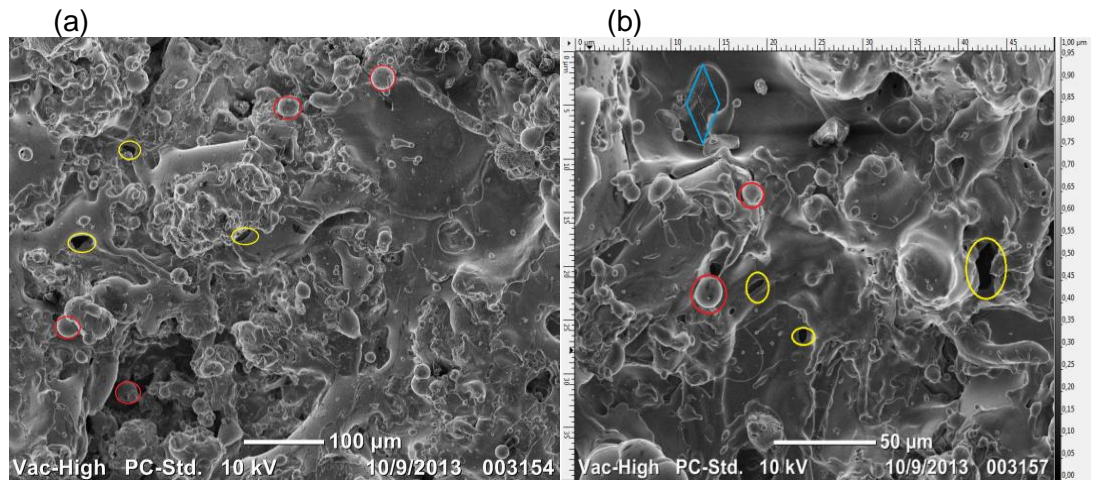
**Figura 57: Micrografía SEM M5. (a) Vista General, (b) Detalle**



**Figura 58: Micrografía SEM M6. (a) Vista General, (b) Detalle**

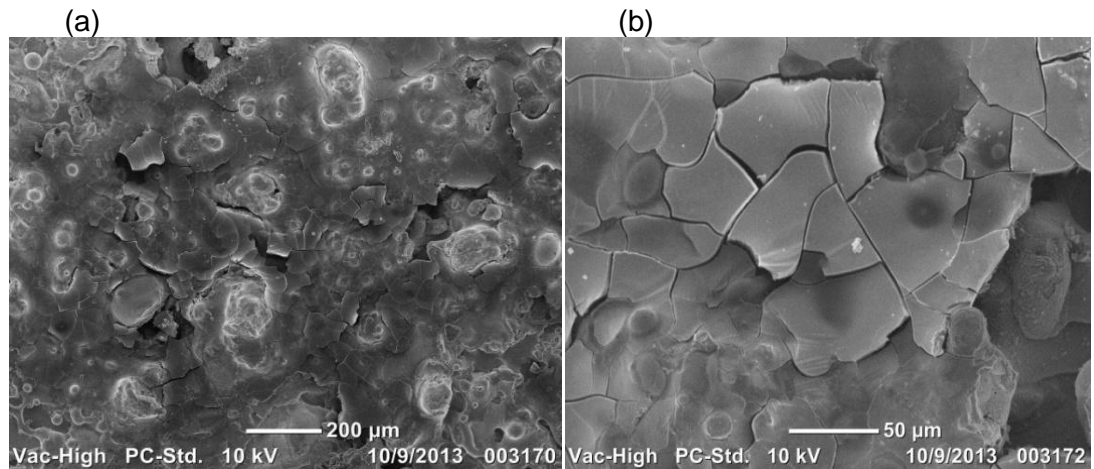
La muestra M7 de la figura 59 muestra una gran cantidad de partículas disgregadas a lo largo de la superficie y adhiriéndose a los splats, estas salpicaduras son ocasionadas por el impacto de partículas que tuvieron cierto grado de solidificación en el trayecto pero proyectadas a altas presiones hacia el sustrato, la aparición de poros concentrados en las zonas de mayor acumulación de partículas, aun así se nota una homogenización en la superficie del recubrimiento, debido a los altos voltajes de parametrización las partículas de gran tamaño son prácticamente nulas, las contracciones en el proceso de solidificación no fueron tan extremas al notarse una disminución en la aparición de micro grietas. [37]





**Figura 59: Micrografía SEM M7. (a) Vista General, (b) Detalle**

En la figura 60 correspondiente a la muestra M8 sigue mostrando un comportamiento atípico como lo ha mostrado en el análisis metalográfico, se ve recristalización del material en la imagen(a) con presencia de grietas de gran tamaño entre los límites de los splats pero a la vez se ve un comportamiento compacto en el recubrimiento por las altas presiones de aire manejadas en los parámetros, esto se comprueba por la alta dureza que mostro hacia la superficie en la prueba Vickers (Tabla 12) <sup>[38]</sup>



**Figura 60: Micrografía SEM M8. (a) Vista General, (b) Detalle**

El comportamiento de las muestra M9, figura 61 tiende a ser la del presente en monocapas de 560AS mostradas en otros estudios por su predominio de partículas de gran tamaño y formación aislada de splats <sup>[32]</sup> y disminución notable de porosidad demostrando un buen llenado de vacíos en la aplicación debido a la combinación de alta presión y alto amperaje en la aspersión lo cual se ha visto en otras muestras mejora notablemente el comportamiento superficial del recubrimiento. <sup>[35]</sup>

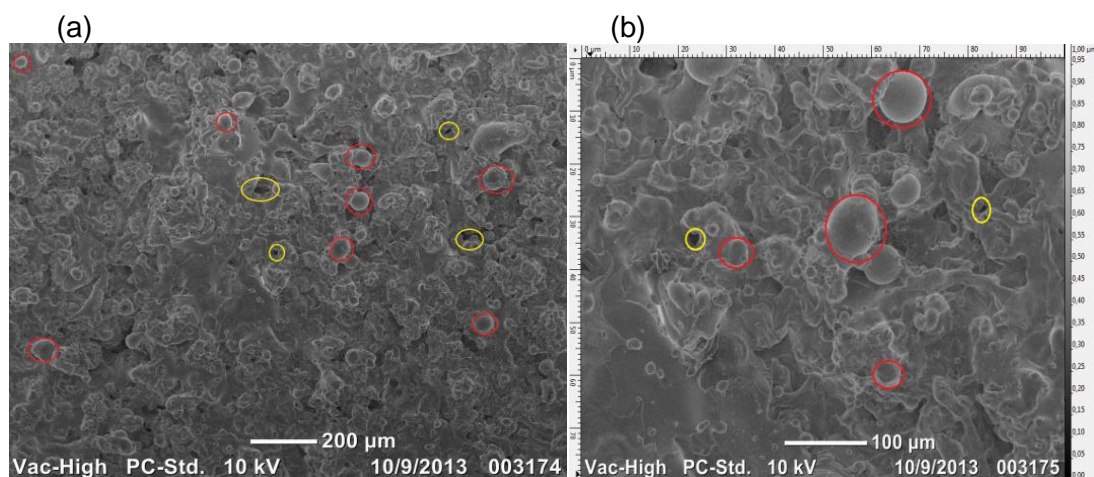


Figura 61: Micrografía SEM M9. (a) Vista General, (b) Detalle

## 5.5. Análisis químico por Fluorescencia de rayos X (FRX).

### 5.5.1. 140MXC – 530AS

En la tabla 17 se muestra la composición química en porcentaje obtenida de la superficie del recubrimiento de la muestra M1 por medio del equipo de Fluorescencia de rayos X, así como los rangos de tolerancia en las medidas y el respectivo espectro (figura 62) donde se ilustra las concentraciones de los elementos.

Por lo elementos encontrados se puede hablar de que la composición del alambre 530AS puede corresponder a la de un acero AISI SAE 1020 por lo encontrado en las tablas de composición del Metal Handbook. <sup>[40]</sup>

Como se puede observar contiene los elementos de los dos materiales aspersados con altas concentraciones de cromo por parte del 140MXC, se refleja tanto en los análisis de 1409MXC-530AS como en los de 140MXC-560AS que el nano compuesto tiene una mezcla de elementos de los otros dos alambres aumentando las propiedades de los mismos.



Tabla 17: Composición química de la muestra M1. Fuente: Autor del proyecto

Name M1 140MXC-530AS		Class Low alloy LE		Date 12/02/2014		Time 09:57:55		Duration 15.6 s			
<b>Element</b>	Al %	Si %	P %	S %	Ti %	V %	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Cu %
	1.65	0.17	0.11	0.00	0.07	0.01	5.95	0.92	75.24	0.90	0.00
±	0.080	0.078	0.014	0.039	0.035	0.010	0.091	0.049	0.192	0.052	0.005
<b>Element</b>	Nb %	Mo %	W %	Pb %							
	1.61	1.21	3.05	0.18							
±	0.004	0.019	0.131	0.017							

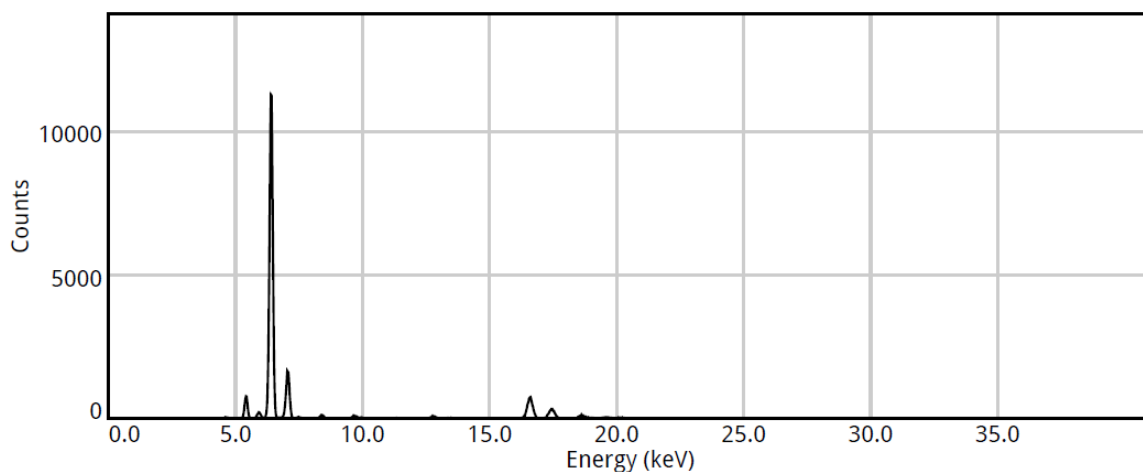
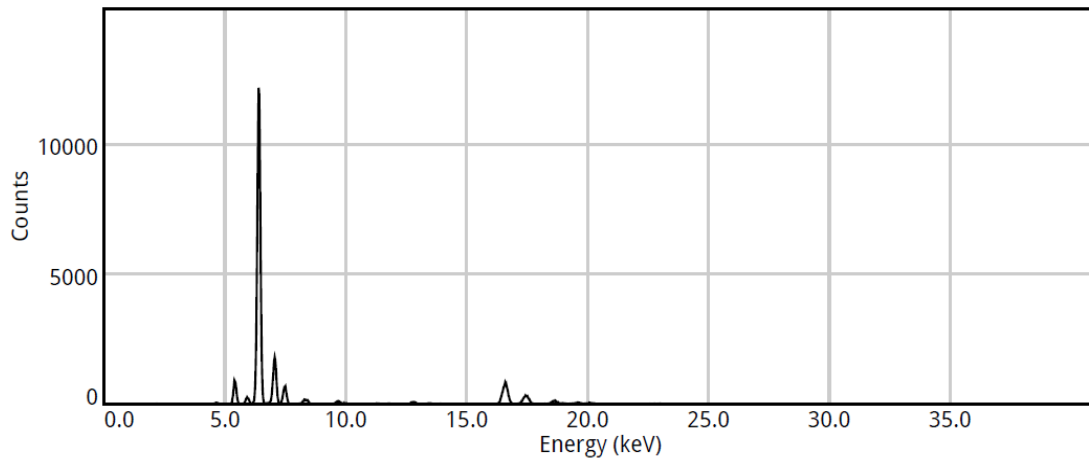


Figura 62. Espectro composición química del recubrimiento en M1.

Tabla 18: Composición química de la muestra M9. Fuente: Autor del proyecto

Name M9 140MXC-530AS		Class Low alloy LE		Date 12/02/2014		Time 09:56:05		Duration 15.5 s			
<b>Element</b>	Al %	Si %	P %	S %	Ti %	V %	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Cu %
	1.98	0.00	0.13	0.00	0.15	0.01	6.14	0.95	65.79	7.69	0.00
±	0.099	0.070	0.014	0.037	0.037	0.010	0.087	0.047	0.228	0.071	0.003
<b>Element</b>	Nb %	Mo %	W %	Pb %							
	1.60	1.09	2.97	0.21							
±	0.005	0.017	0.122	0.010							



**Figura 63. Espectro composición química del recubrimiento en M9.**

### 5.5.2. 140MXC -560AS

En la tabla 19 y 20 se puede ver la combinación de elementos que contiene el alambre 560AS que al entrar en comparación con las composiciones químicas de Metal Handbook <sup>[40]</sup> se encuentra un comportamiento similar al acero inoxidable AISI SAE 420, el restante de los elementos son trazas de los polvos contenidos en le alambre140MXC y se puede notar un aumento del porcentaje de Cr respecto a la contra muestra de la misma combinación así como de tungsteno esto se ve reflejado en el comportamiento a pruebas de dureza de la muestra M8

Tabla 19: Composición química de la muestra M1. Fuente: Autor del proyecto

Name		Class		Date		Time		Duration
M1 140MXC-560AS		metal_fp		12/02/2014		09:01:38		15.5 s
<b>Element</b>	Fe %	Ni %	Cr %	W %	Nb %	Mo %	Ti %	Mn %
	48.37	34.85	11.93	1.98	1.73	0.80	0.20	0.12
<b>±</b>	0.116	0.114	0.063	0.042	0.008	0.006	0.023	0.028
Grades: RA330 (4.82), SS330 (4.88)								

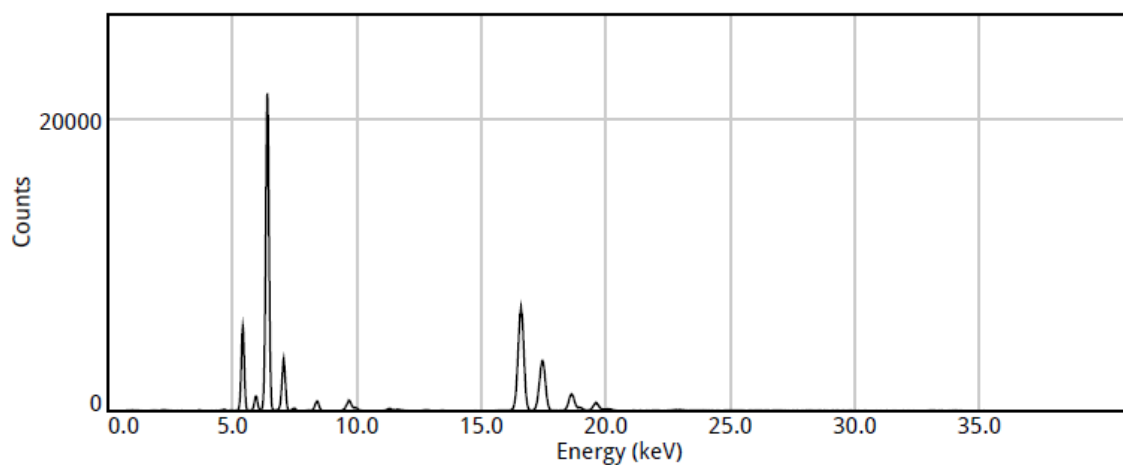


Figura 64. Espectro composición química del recubrimiento en M1.

Tabla 20: Composición química de la muestra M8. Fuente: Autor del proyecto

Name	Class			Date	Time			Duration	
M8 140MXC-560AS	metal_fp			12/02/2014	09:26:11			15.5 s	
<b>Element</b>	Fe %	Cr %	W %	Nb %	Mo %	Ni %	Mn %	Ti %	Cu %
	72.35	15.88	4.48	4.24	2.06	0.66	0.18	0.11	0.04
$\pm$	0.174	0.083	0.059	0.014	0.009	0.023	0.040	0.024	0.011
Grades: SS444 (1.78), SS434 (3.64)									

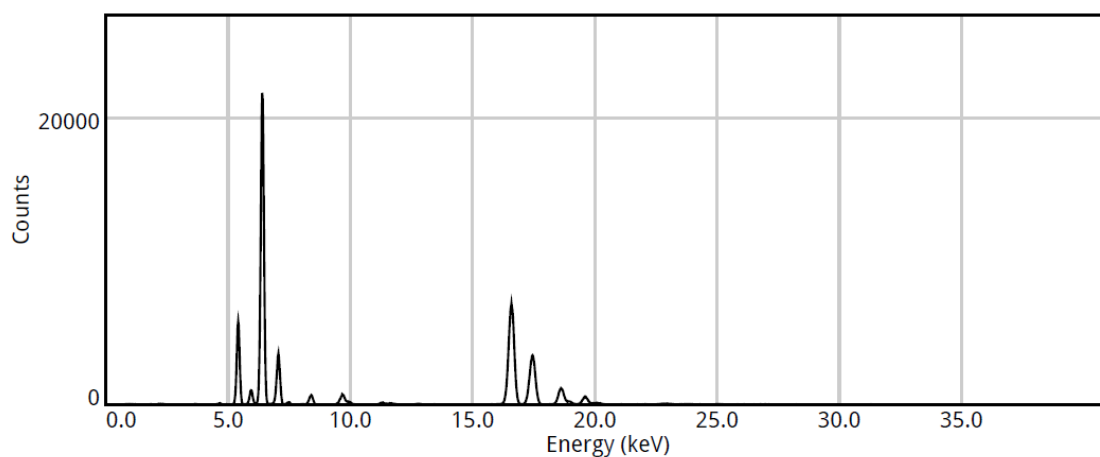


Figura 65. Espectro composición química del recubrimiento en M8.

### 5.5.3. Sustrato

Por los resultados obtenidos con el equipo de fluorescencia que están registrados en la tabla 21 se confirma el tipo de material contrastando con las composiciones químicas encontradas en el Metal Handbook <sup>[40]</sup> y por la composición química brindada por el fabricante en la tabla 6.

Tabla 21: Composición química del sustrato. Fuente: Autor del proyecto

Name SUSTRATO	Class metal_fp			Date 12/02/2014			Time 09:30:00
<b>Element</b>	Fe %	Cr %	Ni %	Mn %	Mo %	Cu %	V %
	95.20	1.93	1.64	0.83	0.20	0.13	0.06
±	0.151	0.021	0.033	0.030	0.003	0.012	0.015

## 5.6. Análisis por microscopia de fuerza atómica (AFM).

### 5.6.1. 140MXC - 530AS

Para el estudio de las muestras por AFM se tuvieron en cuenta tres de variados análisis que realiza el software WSxM, que son lo mayor interés para el estudio topográfico de las superficies de los recubrimientos, los cuales fueron:

- La imagen 3D del comportamiento topográfico.
- La Dimensión fractal.
- El diagrama de rugosidades.

La imagen 3D nos muestra el comportamiento superficial de la zona de análisis debidamente pulida en donde los cambios de tonalidad nos dejan identificar con gran detalle los dos materiales de depósito; zonas claras 140MXC, zonas oscuras 530AS.

La dimensión fractal nos permite evaluar tanto la simetría de la superficie como los relieves que se presentan y dar una descripción sobre la complejidad de una superficie tridimensional al asignar un valor real entre dos y tres <sup>[39]</sup>, si la superficie es un plano su dimensión fractal es dos si su comportamiento tiende a tener relieves de tamaño considerable el valor del fractal tiende a tres.

En el diagrama de rugosidad cada uno de los parámetros del programa es para el análisis matemático, el parámetro que aparece nombrada como Sy hace referencia a la medida de rugosidad RMS.

La dimensión fractal en los tres casos muestra un comportamiento simétrico hacia los dos extremos del espectro lo que demuestra uniformidad en la altura de las muestras y la tendencia de las medidas hacia 2,5 parte (b) muestra la conformación de crestas y valles de gran tamaño por lo cual hace salir a las muestras de su condición bidimensional unas en mayor grado que otras.

Figure 1 consists of three panels. Panel (a) is a 3D surface plot titled '1-4-3-azide 3D View.tz'. The vertical axis is labeled 'Z[nm]' with values -250.0, 250.0, and 500.0. The horizontal axes are 'X[μm]' and 'Y[μm]', both ranging from 0.0 to 6.0. The plot shows a series of parallel ridges. Panel (b) is a 2D intensity map of the same area, showing a semi-circular pattern of concentric rings. The radial axis is labeled 'Dimension' and ranges from 0.0 to 2.5. The angular axis is labeled with values 0, 45, 90, 135, and 180. Panel (c) is a bar chart showing the height in nanometers for various dimensions. The y-axis is labeled '[nm]' and ranges from 0 to 360. The x-axis lists dimensions from 0a to 0y, plus a mean value. The bars are blue, and the values are printed above each bar.

Dimension	Height [nm]
0a	11.6
0b	41.4
0c	316
0d	60.6
0e	80.7
0f	47
0g	104
0h	22.6
0i	48.2
0j	67.7
0k	190
0l	184
0m	9.28
0mean	

77

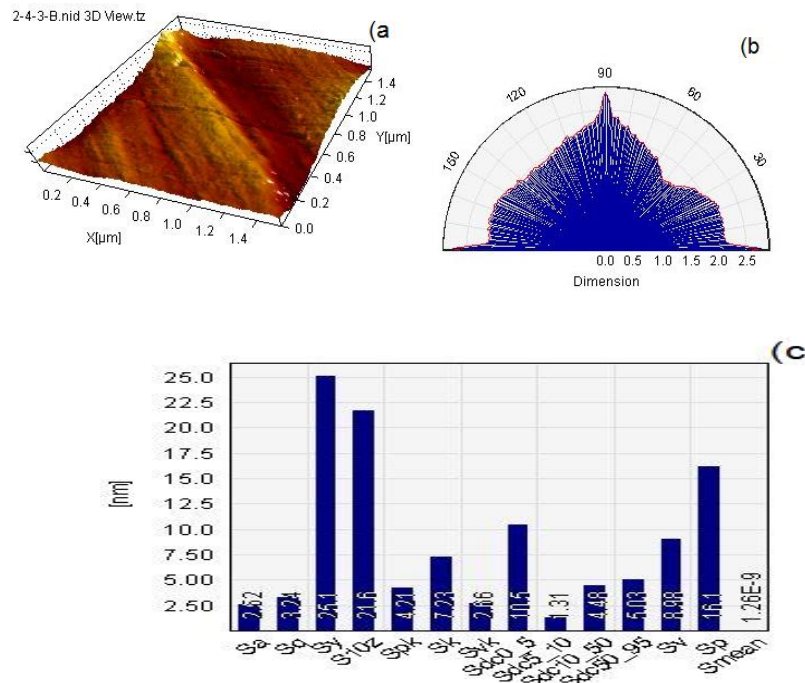


Figura 67. Comportamiento superficial muestra M2. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad.

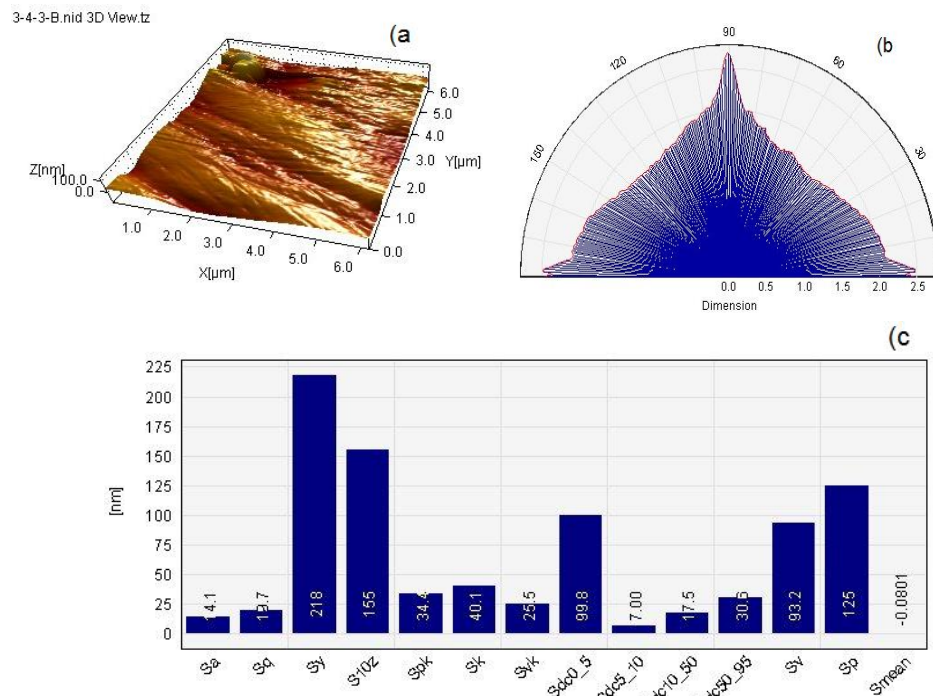


Figura 68. Comportamiento superficial muestra M3. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidades.

En la figura 69 correspondiente a la muestra M4 aunque muestra un comportamiento más uniforme en la imagen topográfica se nota un aumento en la amplitud del espectro de dimensión fractal (parte b) lo cual quiere decir que también aumento en altura los pico de de la superficie reflejado en la zona de color rojo, esta área muestra lo que así parecer es un vacío de gran tamaño que conecta con deposito de material 530AS, esta condición aumenta la diferencia de alturas entre crestas y valles por lo cual altera la simetría de la muestra pero no sus características bidimensionales.

Esta alteración en la diferencias de alturas se ve reflejada en un aumento del valor de rugosidad RMS de 510nm llegando casi al límite máximo ideales la medición es mostrada en la figura 69(c).

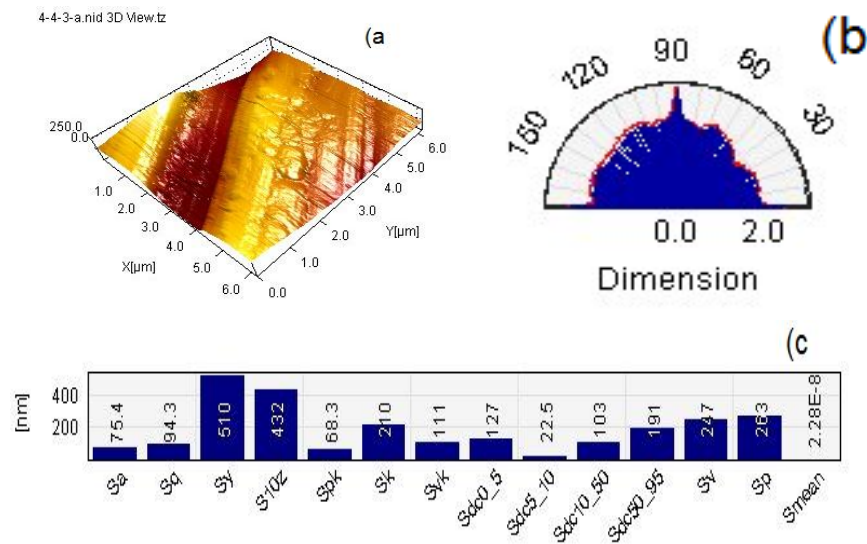


Figura 69. Comportamiento superficial muestra M4. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad.

Para la figura 70(a) se ve el comportamiento topográfico de la muestra mostrando con detalle una serie de franjas ocasionadas por el proceso de pulido estas franjas parecen estar a alturas cercanas entre ellas ya que no alteran la simetría de la superficie pero si su condición de plano al acercarse a un valor de tres en la dimensión fractal (figura 70b), al ser pequeña la diferencia de alturas su valor de rugosidad se encontrara dentro de lo deseado (parte c).

5-4-3-a.nid 3D View.tz

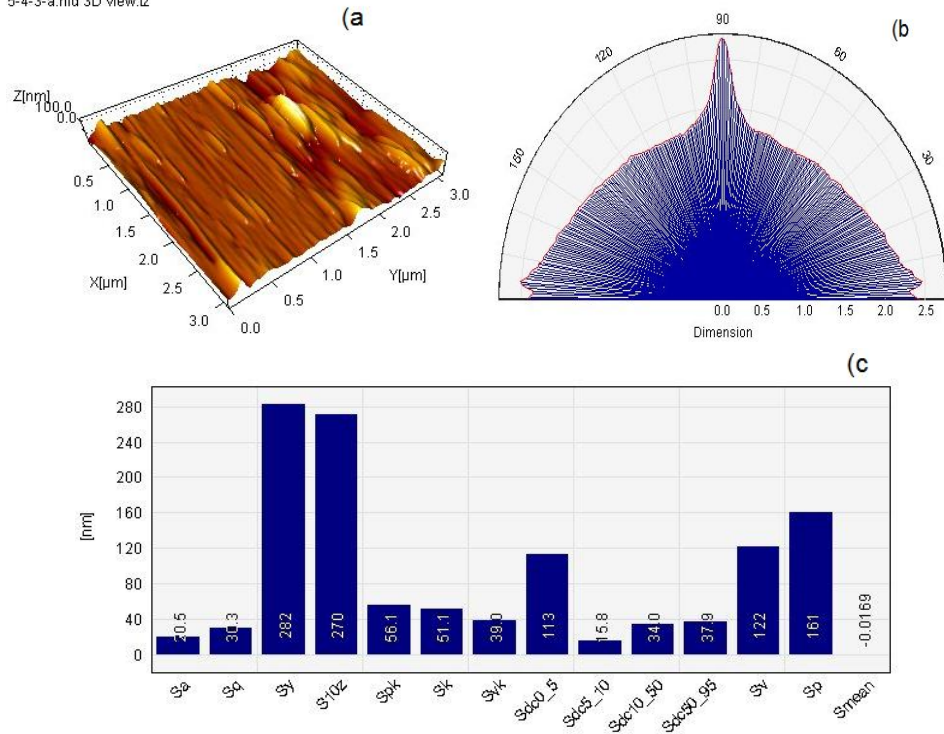


Figura 70. Comportamiento superficial muestra M5. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad.

En la figura 71a se ve mayor uniformidad en la superficie que en otras muestra pero pese al pulido realizado la aparición de una partícula de gran tamaño altera la condición de plano en la muestra, lo cual se refleja en el aumento de la amplitud en la dimensión fractal (parte b), nuevamente la capa del depósito se encuentra simétrica; aunque la alteración en la topografía, significa un aumento en el valor de rugosidad, esto llevaría a alterar el comportamiento del sistema por no eliminar al máximo estas partículas propias del recubrimiento.



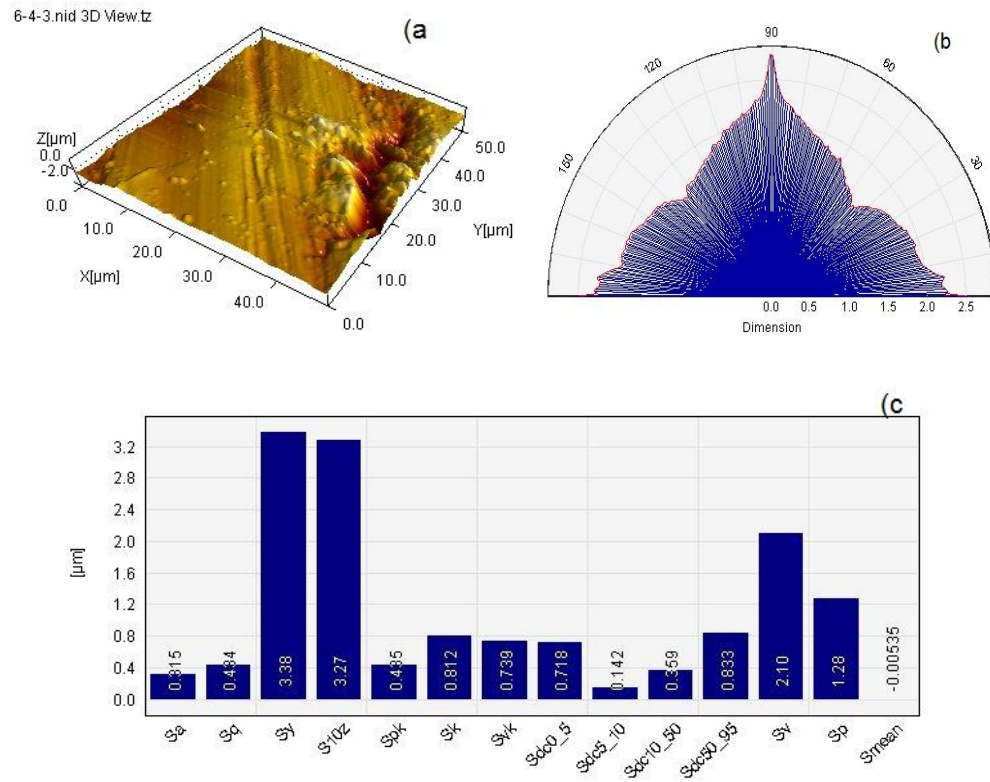
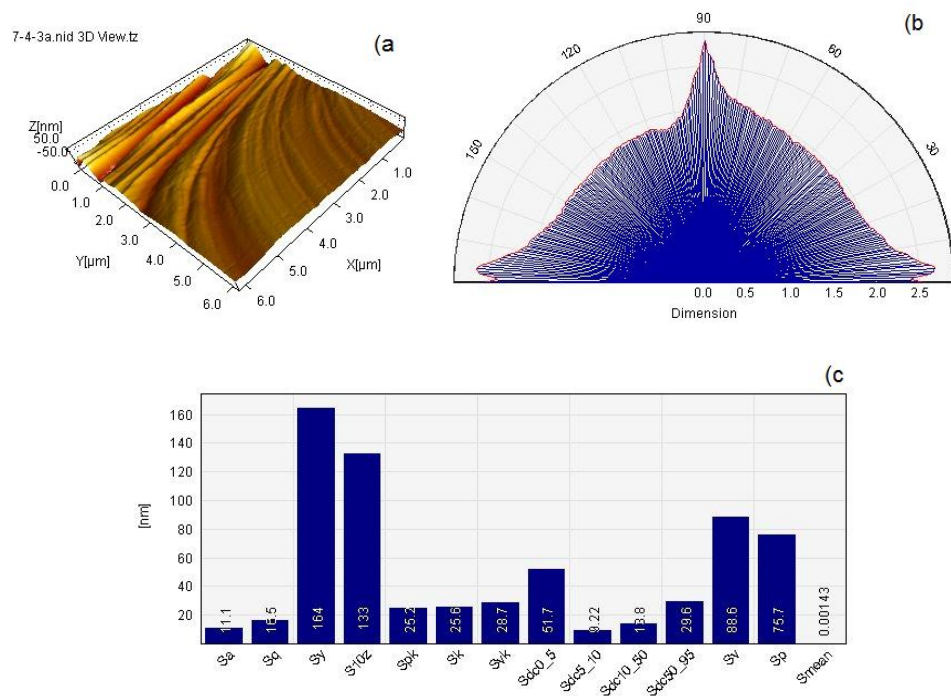


Figura 71. Comportamiento superficial muestra M6. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad.

Se observa una alteración de la simetría de la superficie tanto en la dimensión fractal como en la imagen topográfica de la figura 72, el proceso de pulido que se realizó a esta muestra no fue el mejor, se puede ver una sección del recubrimiento sin alterar, lo que cambió totalmente la condición de plano, al no tener una gran diferencia de alturas entre la zona pulida y la zona sin pulir la medición de rugosidad no aumenta notablemente como se muestra en la parte (c).



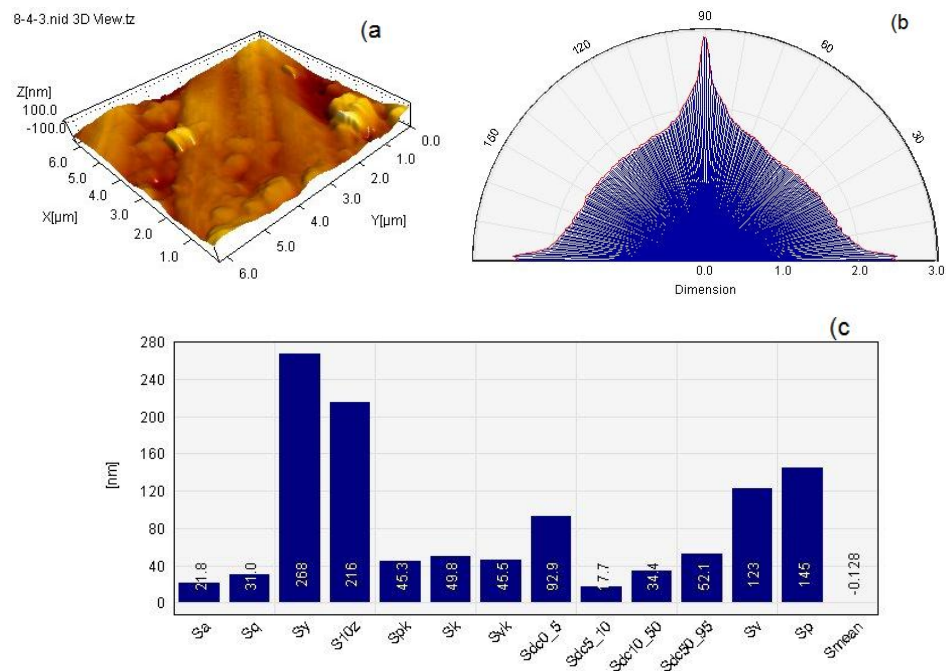


Figura 73. Comportamiento superficial muestra M8. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad

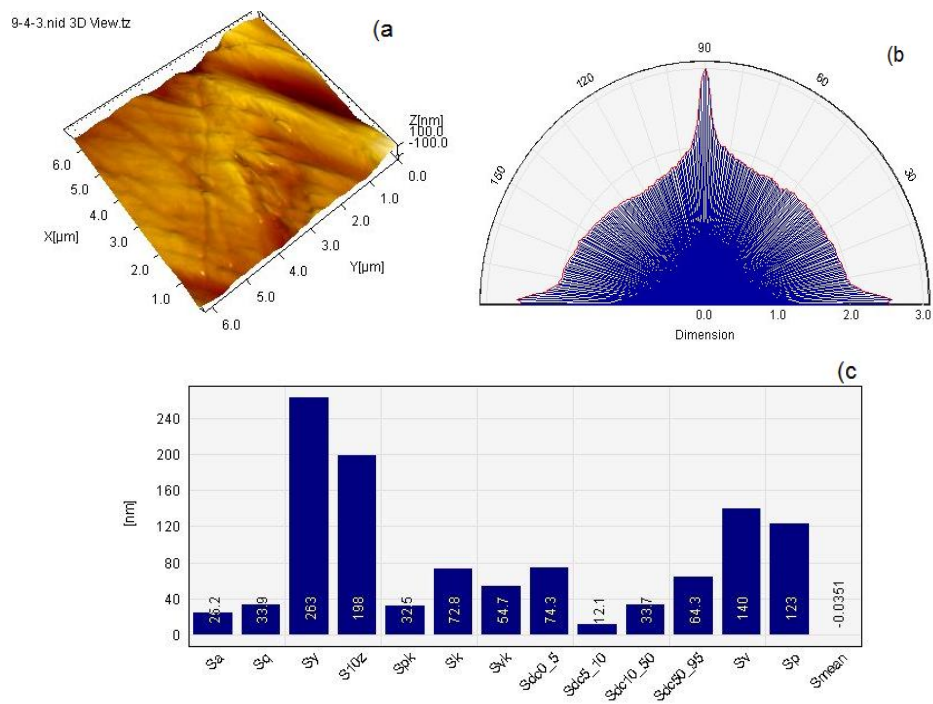


Figura 74. Comportamiento superficial muestra M9. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad

### 5.6.2. 140MXC – 560AS

Se puede observar en la figura 75(a) un pulido defectuosos y aparición de ondulaciones lo cual afecta la condición bidimensional de la muestra esto se puede confirmar con las mediciones en la dimensión fractal (Parte b) que se encuentran por encima de 2 aun así pese al pobre pulido mantiene la simetría en la formación del espectro, la condición de pulido también genero una gran cantidad de cresta a lo largo de la muestra y de altura considerable lo que ocasiono un alto valor de rugosidad de  $1,62\mu\text{m}$  (parte c), muy por encima de los valores deseado esto podría llegar a afectar el funcionamiento de la pieza al estar en servicio.

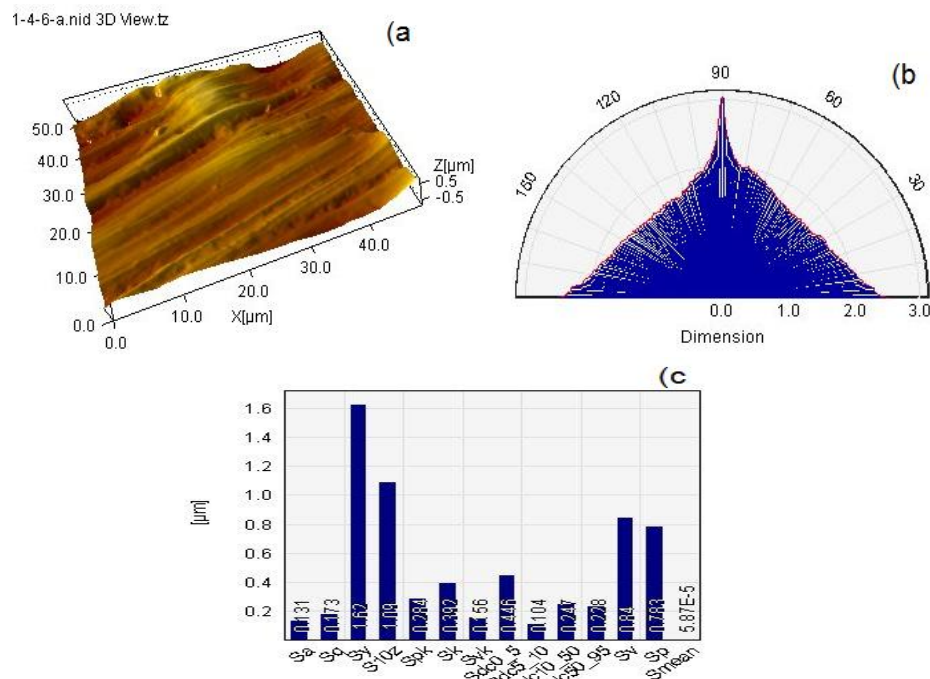


Figura 75. Comportamiento superficial muestra M1. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad.

En la figura 76 en análisis topográfico muestra un gran depresión originada por los vacíos intraplata propios del recubrimiento ocasionando variaciones en la simetría superficial como se observa en la parte b de la figura, aunque la mayor parte de la superficie se encuentra plana este defecto altera la condición de uniformidad y también genera un aumento en la rugosidad de la muestra como lo evidencia el diagrama de rugosidades imagen (c) de la figura.



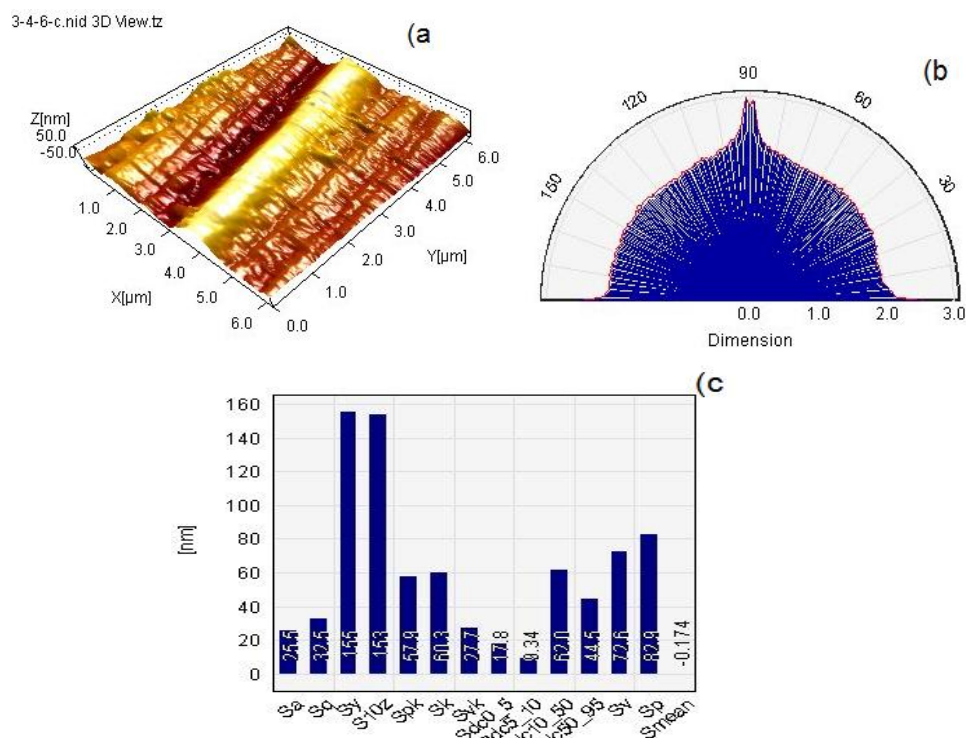


Figura 77. Comportamiento superficial muestra M3. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad.

En la figura 78 se puede ver un comportamiento similar al de la muestra M5 de 140MXC – 530AS, los dos muestran gran cantidad de inclusiones hacia la parte externa del depósito lo cual al ser pulidas las muestras dejaron al descubierto estos canales, que al momento de realizar el análisis afectaron la bidimensionalidad de la muestra y aunque sin afectar el comportamiento simétrico de la misma, aun así estos canales se vieron reflejados en la alta rugosidad arrojada por el ensayo, nuevamente el comportamiento interno del depósito compromete la eficiencia requerida por parte del recubrimiento.

Para la figura 79 correspondiente a la muestra M5 se ve en comportamiento que por lo visto en la mayoría de las muestras es completamente normal para la técnica de aspersión usada, esto quiere decir uniformidad superficial, simetría a lo largo del depósito y una rugosidad entre 180 y 250nm generada por la aparición de las partículas semifundidas que se superponen en cada una de las capas del depósito vista como ondulaciones en la superficie en las imágenes topográficas por el proceso de pulido.



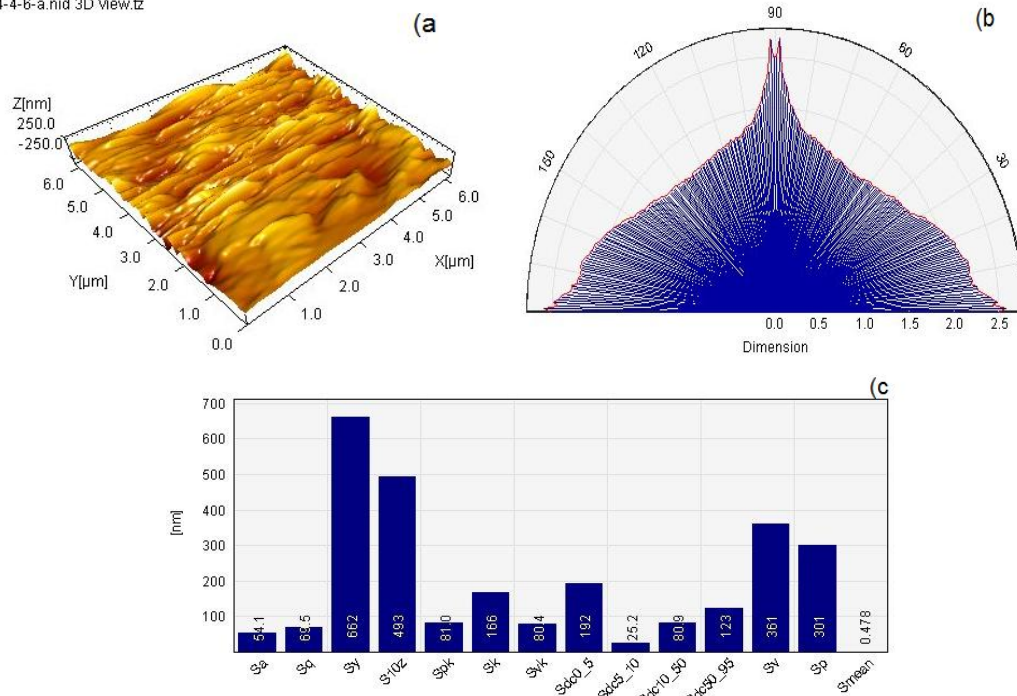


Figura 78. Comportamiento superficial muestra M4. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad

Paras las figuras 80,81 y 82, correspondientes a las muestras M5, M6 y M7 muestran un comportamiento similar respecto a simetría y condición de plano mostrado en la dimensión fractal (Imagen b de cada figura). Respecto a la topografía en cada una de ellas muestran diferencias por la aparición de protuberancias por partículas semifundidas en las muestras M6 Y M7 siendo de mayor tamaño en M6, lo cual se ve reflejado en la diferencia de rugosidad entre las dos (imagen c).

En M5 tiene un comportamiento dentro de lo normal de esta combinación de alambres y sus parametros de aspersion se encuentran dentro de los valores dados por el fabricante lo cual muestra baja porosidad al ver la uniformidad de la superficie y partículas de bajo tamaño al no presentarse los pico de las otras dos muestras con una rugosidad aceptables por la razón anterior.

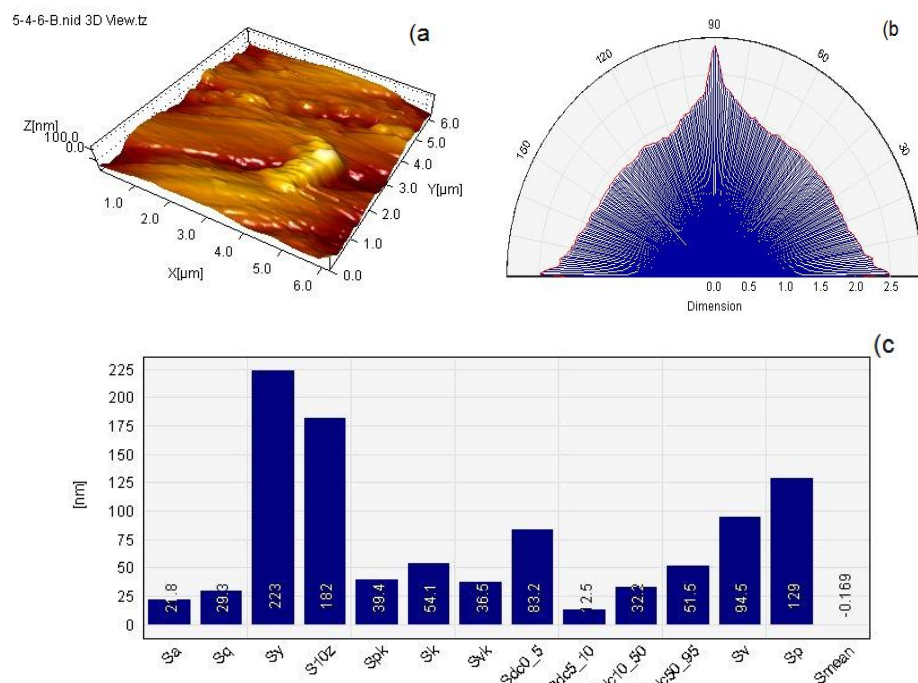


Figura 79. Comportamiento superficial muestra M5. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad

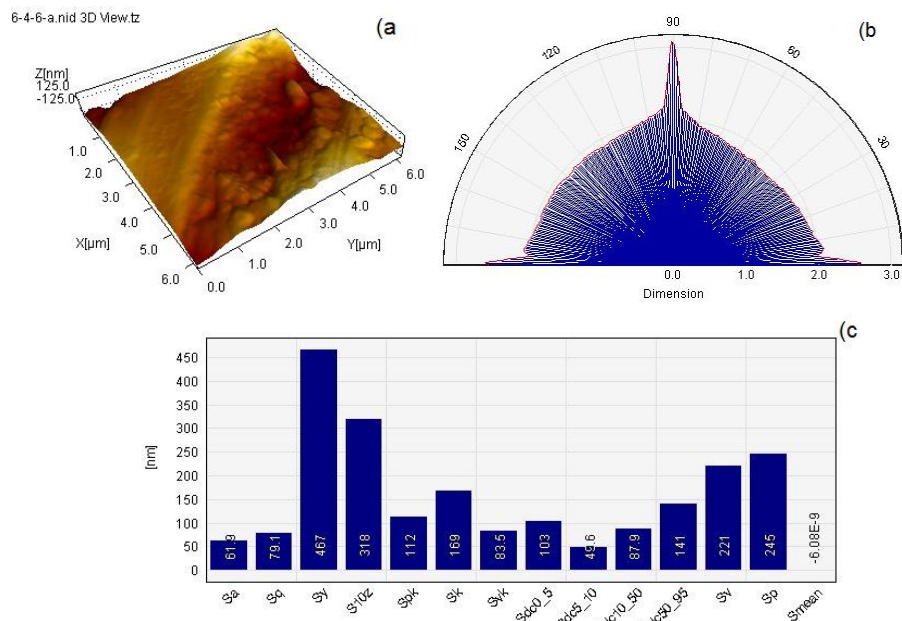


Figura 80. Comportamiento superficial muestra M6. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad



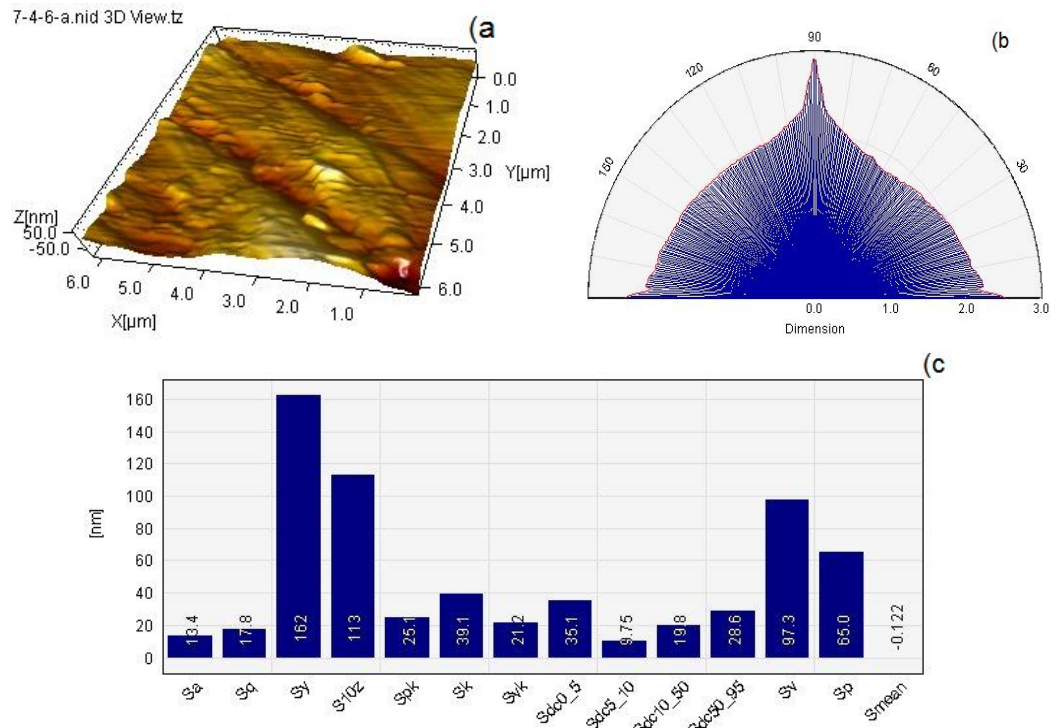


Figura 81. Comportamiento superficial muestra M7. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad.

Lo compacto del depósito observado en las otras pruebas se comprueba en esta, aun al tener espesores realmente bajos la ausencia de poros favorecieron la uniformidad y simetría de gran calidad en la muestra (figura 82), en el momento de realizar el pulido elimino las grietas superficiales dando un buen acabado y brindando el valor de rugosidad más bajo en todo los depósitos, estas características le pueden llegar a brindar un buen desempeño al recubrimiento.

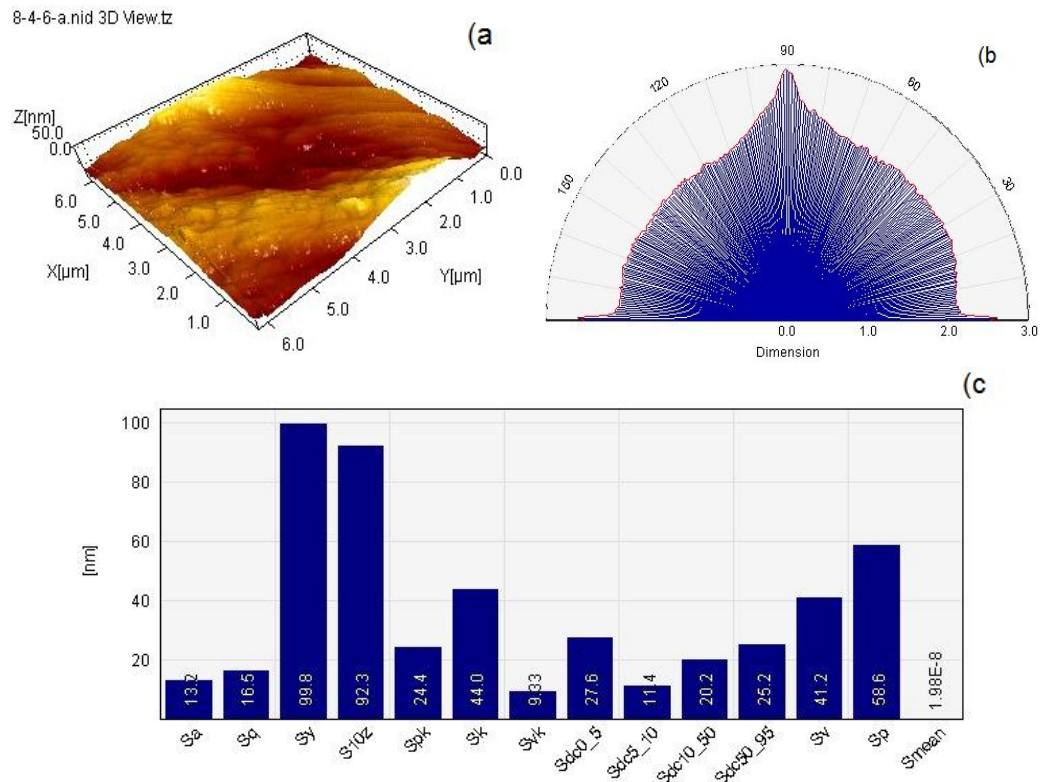


Figura 82. Comportamiento superficial muestra M8. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad.

Nuevamente se observa un comportamiento superficial indeseado, por lo que se puede observar en la figura 83 hay una gran cantidad de vacíos y canales de gran profundidad posiblemente quedaron descubiertos inclusiones y vacíos al momento de realizar el proceso de pulido de la muestra, Por esta razón se ve completamente afectada la simetría de la superficie y la condición de plano de la misma como se puede observar en la irregularidad del espectro de dimensión fractal de la imagen b, se puede decir cómo puede llegar a afectar las capas inferiores del recubrimiento la integridad de la pieza ya que aunque en la morfología de esta muestra no se notaba comportamientos erráticos las capas internas si mostraron la gran cantidad de poros conectados. Estas porosidades ocultas al ser descubiertas a la superficie generaron una condición de rugosidad bastante mala con un valor registrado en la imagen c de 1,40μm.

9-4-6a.nid 3D View.tz

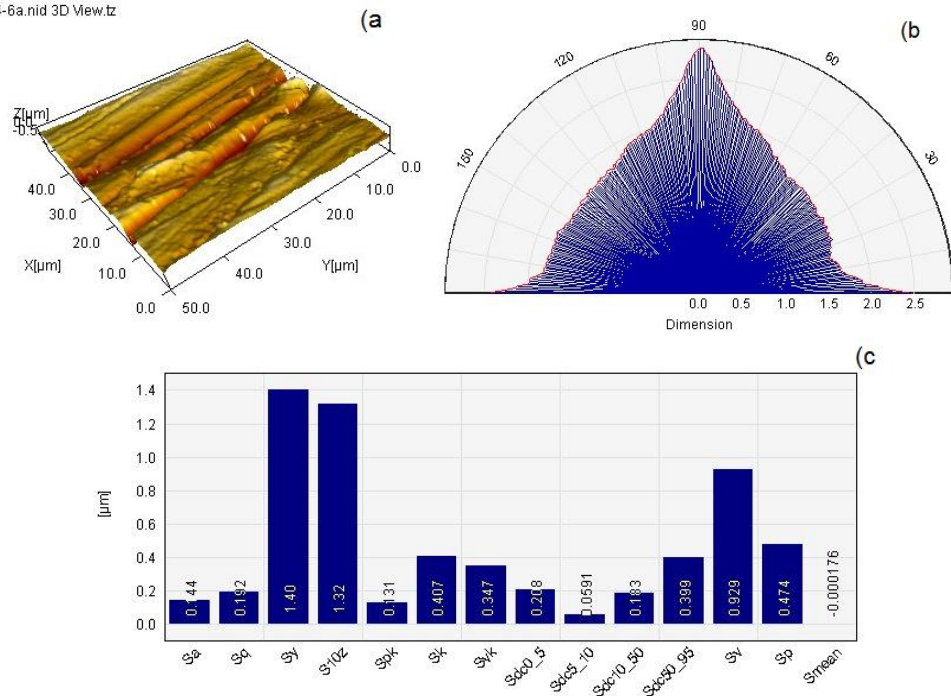


Figura 83. Comportamiento superficial muestra M9. (a) Imagen topográfica, (b) Dimensión Fractal, (c) Rugosidad.

## 6. CONCLUSIONES.

De las diferentes pruebas realizadas para los nueve depósitos tanto para la combinación 140MXC – 530AS como para la de 140MXC – 560AS se obtuvieron las siguientes conclusiones.

Las condiciones de espesor que se obtuvieron en las dos combinaciones de alambres dependen en mayor parte de la habilidad del operario del equipo, ya que por lo que se pudo observar al realizar las mediciones hubo una gran variación entre las muestras, así sus parámetros de aspersión fueran similares, el caso más representativo con el cual se observa este comportamiento es el de la muestra M8 del depósito 140MXC – 560AS.

Los parámetros de aspersión recomendados por los fabricantes brindan buen desempeño en el depósito pero no los mejores debido a la aplicación en monocapa simultánea debido a esto es de suma importancia la combinación adecuada de parámetros para evitar defectos que puedan comprometer el desempeño del recubrimiento como en el caso del exceso de porosidad y fragmentos de alambre que se presenta más hacia la superficie del depósito 140MXC – 530AS, debido al bajo amperaje usado en la mayoría de las muestras.

Se encontró homogenización alta o presencia de pseudo aleaciones en la zona media de algunas de las muestras de 140MXC – 530 AS los cuales otorgo altos valores de dureza en esa zona en algunos casos en el mismo rango de los registrados por los fabricantes del 140 MXC y con ausencia casi total de defectos, caso contrario a los depósitos de 140MXC – 560AS estos registraron valores de dureza más altos hacia la superficie pero de igual manera cercanos a los otorgados por el Nanocompuesto.

Las altas presiones y altos amperajes usados en los depósitos 140MXC – 560AS favorecieron a el comportamiento superficial de los recubrimientos al incrementar la formación de splats por ende la condición de rugosidad se acercó mas a la ideal por lo registrado en las pruebas por AFM.

En la muestra M8 del depósito 140MXC – 560AS presento un comportamiento similar el de monocapa de 140MXC ya que presenta gran compactación, presencia de inclusiones intrasplat propia del material y dureza alta en la superficie, así como formación de partículas en forma de cristales generadas normalmente por los polvos que contienen los nanocompuestos y gran comportamiento superficial por lo observado en el AFM.

El mejor comportamiento registrado en cada una de las pruebas fue el del depósito 140MXC – 560AS ya presento en forma general menos defectos tanto en la parte interna de los depósitos como en la superficie, registrando menores valores de rugosidad por el tamaño reducido de las partículas semifundidas y dureza alta superficial por la buena combinación de los alambres en esta zona.

## **7. RECOMENDACIONES.**

Realizar el estudio de caracterización para los mismos materiales en aplicaciones de bicapa y monocapa para comparar los comportamientos de los mismos en cada una de sus aplicaciones.

Implementar una nueva serie de corridas con nuevas combinaciones de parametros con el fin de optimizar las propiedades de cada uno de los materiales usados en los depósitos.

Enfatizar estudios en la microestructura de los materiales de depósito para saber más de su posible comportamiento en cada una de las fases del proceso de termo aspersión.

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Marulanda, J., Trisancho, J., Cañas, A. (2009). Protección contra la corrosión en sales fundidas de un acero Hot Rolled, en el rango de temperaturas 400° C-600° C, recubierto por rociado térmico con acero inoxidable 312
- [2] Porras Mirón Héctor, 2007; Termorociado en frío para mantenimiento correctivo y preventivo de piezas sometidas a desgastes; trabajo de graduación. Universidad de san Carlos de Guatemala.
- [3] Echeverri, S., Bedoya, J., & Vargas, F. (2007). Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos depositados mediante proyección térmica sobre acero al carbono. *Scientia Et Technica*, XIII, 181-186
- [4]González H., A., Vargas Galvis, F., & López, M. (2007). Influencia de la rugosidad en la microdureza y en la resistencia al desgaste de recubrimientos aplicados mediante proyección térmica. *Scientia Et Technica*, XIII, 163-168.
- [5]ESPITIA luis, SANTA Juan Felipe, BAENA Juan Carlos, ROMO Sebastián, BLANCO Jairo, TORO Alejandro. Cavitación y erosión por lodos de recubrimientos por aspersión térmica. *Scientia et Technica* Año XIII, No 36, Septiembre 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [6] Uzcátegui, A. Valdivieso, A. (2006). Efecto del ambiente tropical en el comportamiento de recubrimientos termo rociados de Zn, Al y Zn/Al, Tesis de grado. Centro de estudios de corrosión. Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.
- [7] MARULANDA Jose, POSADA Brayan, GAMBOA David. Protección contra la corrosión por sales fundidas de un acero al carbono por rociado térmico. *Scientia et Technica* Año XIII, No 36, Septiembre 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [8] Dimaté Castellanos, Laura Marcela. Resistencia a la corrosión en recubrimientos comerciales Metaceram 25050 y Proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. 2011.
- [9] J.B.S. Echeverri, F. Vargas." Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos depositados mediante proyección térmica sobre acero al carbono," *Scientia et Technica*, Vol. XIII. 2007.
- [10] MARANTE 1974.
- [11]METAL SPRAY SAC. Informacion tecnica. [En linea]. <[http://www.metalsprayperu.com/web/informacion\\_tecnica/proceso\\_plasma.html](http://www.metalsprayperu.com/web/informacion_tecnica/proceso_plasma.html)>, Agosto 12 de 2013.
- [12]MARIN Villar Camilo. Revista Metal Actual. Pág. 42. Colombia 2010.
- [13] MARIN Villar Camilo. Revista Metal Actual. Pág. 45. Colombia 2010.
- [14] MARANTE 1974.
- [15] Thermal Spray Testing Inc. Electric Arc Spray Coating.
- [16] Thermal Spray Testing Inc. Electric Arc Spray Coating.
- [17] RUDZKY 1983
- [18] OSU. Spraying of Zn, Duisburg, Alemania.
- [19] ASM, Handbook of thermal spray technology. 2004. p. 329.
- [20] HERNANDEZ González Andrés. Estudio de la influencia de las propiedades físicas y mecánicas en el comportamiento tribológico de recubrimientos duros para

herramientas de corte y procesamiento de polietileno. Universidad de Antioquia, 2008

[21] Eutronic, Eutronic arc 530 wire, Eutronic, Editor. 2007: Menomonee Falls. p. 2.

[22] Eutronic, Eutronic arc 560 wire, Eutronic, Editor. 2007: Menomonee Falls. p. 2.

[23] Praxair, T.a., Nanocomposite wire 140 MXC. 2006. p. 5.

[24] A. Naik. Kardile "Fundamentos del Microscopio Electrónico y sus Aplicaciones en la Industria Textil". UPCommons. 2011.

[25] Open Course Ware UC3M. Microscopía de efecto túnel y Microscopía de Fuerza Atómica. 2009.

[26] TRUJILLO, Calle Gabriel. UTP Laboratorio de Resistencia de Materiales, Guía de laboratorio

[27] Zicarelli S.S. Parodi A.V. Canosa M.E, Gusso M.J. Aplicación de Fluorescencia de Rayos X en el análisis de componentes del cemento relacionados con la durabilidad. Su uso en la determinación de óxidos de sodio y potasio y de compuestos de azufre. Argentina 2012.

[28] Gutiérrez-Ginés, M.a J.' y Ranz, V. Utilización De Un Equipo Portátil De Fluorescencia De Rayos X Para El Estudio De Metales Pesados En Suelos: Puesta A Punto Y aplicación A Vertederos. Universidad de Alcalá. Madrid. 2010

[29] Pasandideh-Fard, M., et al., Splat Shapes in a Thermal Spray Coating Process: Simulations and Experiments. Journal of Thermal Spray Technology, 2002. 11(2):

[30] Knight, R. and R.W. Smith, Thermal Spray Forming of Materials. Powder Metal Technologies and Applications 1998. 7: p. 11.

[31] Robert M. Kain, a.E.A.B., Marine Atmospheric Corrosion Museum Report on the Performance of Thermal Spray Coatings on Steel. Internacional Metalizing Corporation, 1991.

[32] Wang, G.-X., V. Prasad, and S. Sampath, Rapid solidification in thermal spray deposition: Microstructure and modelling. Sadhana, 2001. 26(1): p. 35-57.

[33] La Barbera-Sosa, J.G., et al., Microstructural and mechanical characterization of Ni-base thermal spray coatings deposited by HVOF. Surface and Coatings Technology, 2008. 202(18): p. 4552-4559.

[34] Xiong, H.-B., et al., Three-dimensional simulation of plasma spray: effects of carrier gas flow and particle injection on plasma jet and entrained particle behavior. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004. 47(24): p. 5189-5200 U <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931004002881>.

[35] R.S.C. Paredes\*, S.C. Amico, A.S.C.M. d'Oliveira. The effect of roughness and pre-heating of the substrate on the morphology of aluminium coatings deposited by thermal spraying. Mechanical Engineering Department (DEMEC), Federal University of Paraná (UFPR), 8 September 2005.

[36] CECÍLIA A. DE CARVALHO ZAVAGLIA, R F SILVA, J A SANTOS, CARMO ROBERTO PELLICIARI DE LIMA. Caracterización de recubrimientos de hidroxiapatita depositadas sobre la aleación Ti6Al7Nb a través de aspersión térmica a plasma. 2000, pp. 49-53

[37] Shaw, B.A., A.M. Leimkuhler, and P.J. Moran, Corrosion Performance of Aluminum and Zinc-Aluminum Thermal Spray Coatings in Marine Environments. ASTM, 2011.



- [38] M. Pasandideh-Fard, V. Pershin, S. Chandra, and J. Mostaghimi, Splat Shapes in a Thermal Spray Coating Process: Simulations and Experiments. ASM International. JTTEE5 11:206-217. 16 February 2001).
- [39] J. C. Riaño-Rojas, E. Restrepo-Parra, F. A. Prieto-Ortiz y J. J. Olaya-Flores. Obtención de Propiedades Morfológicas de Materiales por Medio de Procesamiento Digital de Imágenes. Junio 2008.
- [40] ASM, ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. 1990: ASM International.
- [41] p. 206-217 U <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002JTST...11..206P>.
- [42] ASTM. NORMA C 633 01. STANDAR TEST METHOD FOR ADHESION OR COHESION STRENGTH OF THERMAL SPRAY COATINGS. 10 de marzo 2001.
- [43] NACE. NORMA NACE RP 0287-2002. FIELD MEASUREMENT OF SURFACE PROFILE OF ABRASIVE BLAST CLEANING STEEL SURFACES USING A REPLICA TAPE. Septiembre 2002.
- [44] Galarraga, M., González, F.(2002). Evaluación de la Resistencia al desgaste Abrasivo y Erosivo de Recubrimientos tipo Cermet depositado por HVOF, Trabajo especial de grado. Universidad central de Venezuela, 38.
- [45] Galarraga, M., González, F.(2002). Evaluación de la Resistencia al desgaste Abrasivo y Erosivo de Recubrimientos tipo Cermet depositado por HVOF, Trabajo especial de grado. Universidad central de Venezuela, 40.
- [46] Electron Microscopy and Photography. Kodak Publication.